



Title	なだれの階級
Author(s)	清水, 弘; SHIMIZU, Hiromu
Citation	低温科学. 物理篇, 24, 211-220
Issue Date	1966-03-22
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18044">https://hdl.handle.net/2115/18044</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	24_p211-220.pdf



## なだれの階級\*

清水 弘

(低温科学研究所 雪害科学部門)

(昭和40年10月受理)

### I. ま え が き

なだれの規模に関する数量的な表示としては、なだれ雪の質量、体積、走行距離、幅、なだれ地の地形的要素などが、従来の調査に於いても個々にとりあげられていた。もし、なだれの特性をよく表わし、他のなだれと容易に比較し得るようななだれ記述の方法が得られれば、なだれの調査、研究にとって益することが大きいであろう。この際、測定が比較的容易であるような基本量を撰択しなければならない。

なだれが災害問題として取扱われる場合には、その規模(没埋量)、強さ(破壊力)などがまず注目される量であろう。これらの量を撰択するに当って、簡単な模型についてなだれの運動を考察し、次になだれを階級で表現する3種類の量を試案として定義した。

### II. 簡単な模型によるなだれの運動の考察

実際のなだれは極めて複雑な運動機構をもっているが、その基本的なエネルギー機構を考察するために、最も簡単な模型について考えてみよう。

傾斜角 $\theta$ なる一様な斜面上のA点に拘束されていた質量 $m$ の雪塊が、拘束を外されて斜面を滑落し始めたとする(第1図)。この運動の駆動力は重力の斜面成分 $mg \sin \theta$ であり、逆方向に摩擦抵抗が働く。一般に運動する物体に作用する摩擦は、速度のある増加函数 $f(v)$ であると考えられる。したがって、速度の増加につれて摩擦は増大し

$$f(v) = mg \sin \theta$$

となったとき雪塊の速度は終速度 $V_T$ に到達し、以後は定常的に等速度運動によって斜面を滑落する。

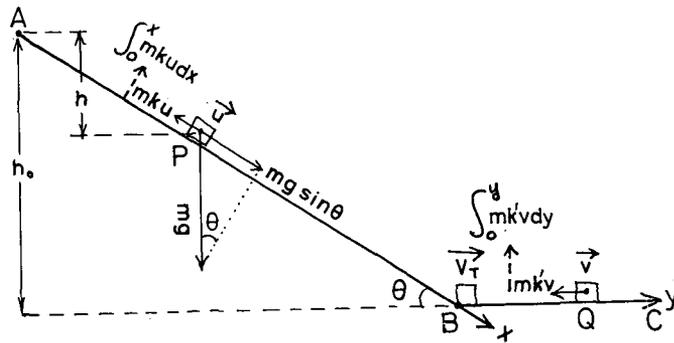
斜面を滑落する雪塊は、自己の位置エネルギーの減少分を運動エネルギー、及び熱、音響など摩擦、衝撃による散逸エネルギー\*\*に変換し、消耗する。

斜面を滑落する雪塊が停止するためには

- (1) 十分大きな障碍物(破壊に必要なエネルギーが、雪塊の運動エネルギーよりも大きな)

\* 北海道大学低温科学研究所 業績第755号

\*\* 実際のなだれの場合は、なだれ雪の内部運動による摩擦、なだれ雪の歪みなども散逸エネルギーに加わってくる。



第1図 斜面を滑落する雪塊

が雪塊の進路上に存在するか、或いは

(2) 斜面条件が変化し、走行抵抗が増大して雪塊の運動の駆動力を上回ることが必要である。ここでは第1図に示すように、斜面がその末端 B で水平面 BC に移行する場合を考えた。

BC 面での水平運動は、運動の駆動力は既になく、摩擦だけが運動方向と逆向きに働いて雪塊を減速させ、停止させる。次に、以上に述べたような条件での雪塊の運動について更に考察しよう。

### 1. 斜面運動

雪塊 (質量  $m$ ) の滑落開始点 A を原点とし、斜面に沿って下向きに  $x$  軸をとり、 $x$  方向の雪塊速度を  $u$  とする。摩擦抵抗が  $m$  及び  $u$  に比例すると仮定すれば、雪塊の運動方程式は、 $t=0$  で  $x=0$ ,  $u=0$  なる初期条件の下で

$$\frac{du}{dt} = g \sin \theta - ku \quad (1)$$

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{g}{k} \sin \theta (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

$$x = \frac{g}{k} \sin \theta \left( t + \frac{1}{k} e^{-kt} - \frac{1}{k} \right) \quad (3)$$

終速度は (1) 式から

$$V_T = \left( u \right)_{\frac{du}{dt}=0} = \frac{g}{k} \sin \theta \quad (4)$$

(2) 式によると、雪塊が終速度に達するには、理論的には無限時間、無限距離を必要とする。しかし、速度が理論的終速度  $V_T$  の 90% になれば、それを実用上の終速度としてさしつかえないであろう。雪塊が停止状態から滑落を開始し、実用終速度  $V_T^*$  ( $=0.9 V_T$ ) に到達するまでの斜面滑落距離  $x_0$  は、式 (2), (3) から

$$x_0 = 1.4 \frac{g}{k^2} \sin \theta \quad (5)$$

となることがわかる。従って、長い一様な斜面を滑落する雪塊は、 $x_0$  を越すと斜面距離 (又は

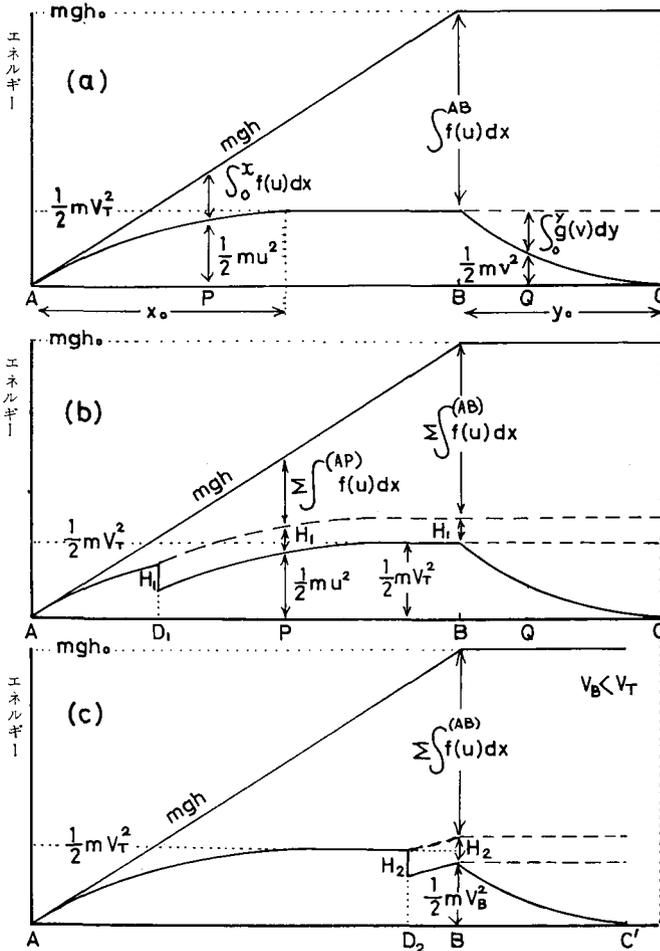
落差)には無関係に、近似的に速度  $V_T^*$  なる等速度運動を行なう(第2図(a), (b))。斜面上に障害物があると、雪塊はその運動エネルギーを破壊エネルギーに変換して仕事をする。このため斜面を滑落する質量  $m$  なる雪塊の破壊能力は近似的に  $\frac{1}{2} m V_T^*$  を限界とする。

今、斜面上にある障害物を破壊するのに必要なエネルギーを  $H$ 、雪塊がこれに衝撃するときの速度を  $u$  とすると

$\frac{1}{2} mu^2 > H$  ならば、雪塊は障害物を破壊して更に進行を続け、

$\frac{1}{2} mu^2 = H$  ならば、雪塊は障害物を破壊して一旦停止し、

$\frac{1}{2} mu^2 < H$  ならば、雪塊は障害物にせきとめられて停止する。



第2図 雪塊の斜面運動、水平運動に於けるエネルギー状態

(a) 障害物のない場合 (b) 斜面上部で障害物を破壊した場合 (c) 斜面下部で障害物を破壊した場合

$\frac{1}{2} mu^2 > H$  なる場合に、斜面の上部あるいは下部で障害物破壊が行なわれるときのエネルギー状態を第2図 (b), (c) に示した。

## 2. 水平運動

十分長い斜面を滑落する雪塊が実用終速度  $V_T^*$  に達して、B から水平運動に移ったとする (第1図, 第2図)。B 点に於ける斜面運動から水平運動への移行がエネルギー消費を伴わずに行なわれ、従って水平運動の初速度は  $V_T^*$  であると仮定しよう。

B を原点として BC 方向に  $y$  軸をとり、 $y$  方向の雪塊の速度を  $v$ , 摩擦抵抗  $mk'v$  をとする。  $t=0$  で、 $v=V_T^*$ ,  $y=0$  なる初期条件を与えると、この雪塊の運動方程式は

$$\frac{dv}{dt} = -k'v \quad (6)$$

$$v = \frac{dy}{dt} = V_T^* e^{-k't} \quad (7)$$

$$y = \frac{1}{k'} V_T^* (1 - e^{-k't}) \quad (8)$$

となり、この水平運動中のエネルギー状態は

$$mgh_0 = \frac{1}{2} mv^2 + \int^{AB} mku \, dx + \int_0^y mk'v \, dy \quad (9)$$

で与えられる。ここで、 $h_0$  は雪塊の落下開始点 A から水平面 BC までの落差、右辺第2, 第3項は斜面運動及び水平運動に於ける、雪塊の摩擦による散逸エネルギーである。

雪塊が水平運動に入ると、(9) 式の左辺および右辺第2項は定値をとり、第3項は単調増加関数であるから、右辺第1項の運動エネルギーは単調に減少し

$$mgh_0 = \int^{AB} mku \, dx + \int^{BC} mk'v \, dy$$

となったとき、雪塊は C 点で停止する。C 点の位置は式 (7), (8) から

$$BC = y_0 = \frac{V_T^*}{k'} \quad (10)$$

$y_0$  は、このような斜面条件で与えられる最大水平走行距離である。

## 3. なだれの流動摩擦に関する考察

一般に運動に対する抵抗を速度のある函数  $f(u)$  と考えて、これが  $u$  の冪級数に展開できたとすれば

$$f(u) = k_0 + k_1 u + k_2 u^2 + k_3 u^3 + \dots \quad (11)$$

ここに  $k_0, k_1, k_2, k_3, \dots$  は常数である。 $k_0$  は速度に無関係に一定の値をもった抵抗であるが、これは固体と固体が触れ合って運動する場合顕著にあらわれるから、特に **固体摩擦** と呼ばれる。 $k_1 u$  は運動速度に比例する抵抗で、流体中を余り大きくない速度で運動するとき顕著に現われ **流体摩擦** と呼ばれる。 $k_2 u^2$  は速度の2乗に比例して働く抵抗であるが、これは運動

速度の大きいときだけ顕著になり、速度の小さいときは無視できる。 $k_3 u^3$ 以下の項は普通は問題にならぬほど小さい。(萩原著書<sup>1)</sup>の23頁参照)

前項までの論議は、摩擦が速度に比例する流体摩擦の場合、つまり(11)式に於いて右辺第2項にくらべ他の項は無視できる程度に小さいという仮定の下に行なわれた。実際のなだれの運動に伴う摩擦は、なだれと斜面の間の摩擦、空気との摩擦、なだれが押しわけける斜面積雪の圧縮抵抗、なだれ雪の内部の運動による摩擦などが考えられるが、いずれもその速度特性はわかっていない。

i) なだれ雪に働く全抵抗が、速度に無関係な固体摩擦の形  $k_0$  で表わされる場合は、一様な斜面を滑落する雪塊は

$$\frac{du}{dt} = g \sin \theta - k_0 \quad (12)$$

なる等加速度運動を行ない、上述の論議は成立しない。しかし、なだれの運動に働く摩擦は、流体と固体、流体と流体の間に働く摩擦と考えられるから、このi)の場合は現実に成立しないであろう。

ii) 抵抗が  $f(u) = k_1 u$  なる流体摩擦の形をとる場合について本論文は論議して来た。

iii) 抵抗が速度の2次又はそれ以上の項を含む形で表わされ、それが増加関数であれば、雪塊の斜面運動に終速度が存在するので、ii)と類似の論議がなりたつ。

### III. なだれの階級

なだれの規模の数量的な記述は、その目的によっていろいろな方法が考えられるであろう。多くのなだれ資料の整理、比較など統計処理を施す場合、なだれを階級によって表示することもその一つの方法である。前節の論議を通じて、なだれの階級表示を考えた。

斜面を滑落する雪塊は、自己の位置エネルギーの減少分 P.E. を運動エネルギー K.E. と散逸エネルギー D.E. に変換し、この3の量の間には

$$P.E. = K.E. + D.E.$$

の関係がある。

i) なだれ雪の質量はそれ自身注目さるべき量として撰ばれる。

ii) 次になだれのエネルギー規模を規定する位置エネルギーの減少分 P.E. (=なだれがなした全仕事量)も、なだれの規模記述に有用な量であろう。

iii) なだれによる破壊は運動エネルギーを消耗して行なわれる。従ってなだれの破壊力はなだれのもち得る最大運動エネルギーを限界とする。なだれの達し得る最大速度は斜面条件によって決まり、落差とは直接の関係をもたないので、破壊力については位置エネルギーの減少分とは別個に、運動エネルギーに注目しなければならない。

そこで具体的には、なだれの特性を表わす階級として次の3つの量を定義した。

#### 1. 質量階級 (Mass Magnitude 又は M.M.)

なだれによって移動した雪の質量を表わす階級である。実用単位としては、なだれによっ

て  $m$  トンの雪が移動した場合、質量階級を

$$M.M. = \log_{10} m \quad (13)$$

で表わす (第3図)。

**2. ポテンシャル階級 (Potential Magnitude 又は P.M.)**

なだれ雪が自己の位置エネルギーを消費してなしたあらゆる仕事 (破壊, 摩擦, 音響, 歪みなど) の量を表わす階級である。

なだれ雪の質量を  $m$  トン, 滑落以前と停止以後のなだれ雪の重心間落差を  $h_0$  メートルとしたとき, ポテンシャル階級を位置エネルギーの常用対数

$$\log_{10} mgh_0 \quad (14)$$

で定義するが

$$\log_{10} mgh_0 = \log_{10} g + \log_{10} mh_0$$

で, 右辺第1項は常数 ( $g$ : 重力の加速度) であるから, なだれの位置エネルギーを比較するには第2項だけに注目すればよい。従ってポテンシャル階級の実用単位としては, (14) 式に於いて  $g=1$  とおいて

$$P.M. = \log_{10} mh_0 \quad (15)$$

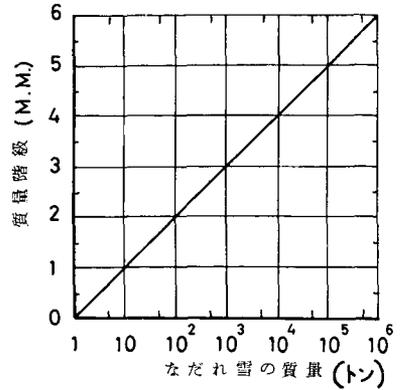
を計算する。

ポテンシャル階級は, なだれのエネルギー規模を表わす量であるが, ポテンシャル階級の高いものが破壊力も大きいとは限らないことに注意しなければならぬ (第4図)。

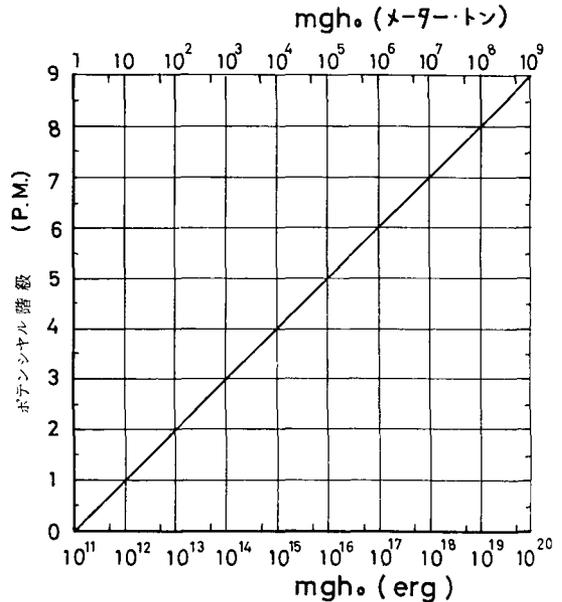
尚莊田<sup>2)</sup>はこれと同様の考察に従って, なだれの階級を定義している。

**3. 破壊力階級 (Destructive Magnitude 又は D.M.)**

なだれのもち得る最大破壊力\*を表わす階級である。斜面に障害物がない場合の終速度を  $V_T^*$  とすれば, 終速度に於ける運動エネルギー (即ち, 質量による最大破壊エネルギー) の常用



第3図 なだれ雪の質量と質量階級 (M.M.)



第4図 なだれのなした全仕事量とポテンシャル階級 (P.M.)

\* けむり型の新雪表層なだれによって屢々惹起されるなだれ風による破壊力については, 次の第4項のような考察を加えねばならない。

対数

$$\log_{10} \frac{1}{2} m V_T^{*2} \quad (16)$$

で破壊力を定義する。(4)式を用いると

$$\begin{aligned} \log_{10} \frac{1}{2} m V_T^{*2} &= \log_{10} \frac{1}{2} m \left( \frac{g}{k} \sin \theta \right)^2 \\ &= \log_{10} \frac{1}{2} g^2 + \log_{10} \frac{m}{k^2} \sin^2 \theta \end{aligned}$$

である。右辺第1項は常数であるから、なだれの破壊力を比較するには、第2項だけに注目すればよい。従って、破壊力階級の実用単位としては

$$\text{D.M.} = \log_{10} \frac{m}{k^2} \sin^2 \theta \quad (17)$$

を計算する。つまり、なだれの破壊力はなだれ雪の質量と斜面条件で記述することができる。 $\theta$ は斜面の傾斜であり、 $k$ は摩擦係数で雪質によって決まるものと思われる。 $k$ の決定については、今後の研究が必要である。

#### 4. なだれ風による破壊作用

前項では、なだれ雪それ自身の慣性力による破壊作用だけを、最も簡単化された模型について考えた。実際のなだれの運動機構が極めて複雑なものであろうことは容易に想像される。例えば、慣性力による破壊作用でも、後続するなだれ雪による作用継続時間の効果も考えなければならぬ。

しかし、本論文の考察と本質的に異なった破壊作用をもつものは、いわゆる“なだれ風”であろう。なだれ風は高速度の新雪表層なだれによって屢々ひきおこされ、爆発的な破壊力を示すことが経験的に知られている。小笠原<sup>3)</sup>は、高速度の新雪表層なだれを密度の大きな可圧縮性流体の運動のように考え、斜面傾斜の変化、径路の方向変化に伴う断熱圧縮および膨脹による、爆発的ななだれ風の発生を理論的に考察した。それによると、例えば障壁に高速度の新雪表層なだれが衝突して、一旦密度が4倍に圧縮された後発生するなだれ風の風速は300 m/sに達する。実際のなだれ現場では、折損された樹幹が屢々鋭利な破断面を示し衝撃波的な破壊作用を考えざるを得ないことがある。従って、なだれの破壊作用を論ずる場合、なだれ風の問題は大きな研究課題となろう。

#### 5. なだれの階級表示の例

前に定義した質量階級 (M.M.)、ポテンシャル階級 (P.M.) について計算 (又は推定) 可能な過去のなだれを第1表に示した (D.M. については、 $k$ の値が未知のため計算できなかった)。これによると、日本国内の通常のなだれは

M.M. は6以下

P.M. は9以下

の階級で表示できると見てよいであろう。

第1表 なだれの質量階級 (M.M.) とポテンシャル階級 (P.M.) の実例

発 生	場 所	質 量 (トン)	M.M.	重 心 差 (m)	P.M.	死 亡	負 傷	文 献
昭 36-1-26	北海道 天塩・下平陸橋	3,000	3.5	150	5.7	—	—	4)
36-4-5	日高・新冠(東面)	4,500	3.7	80	5.6	21	6	5)
36-4-5	日高・額平(北面)	5,600	3.8	70	5.6	12	6	5)
39-4-1	古平・稻倉石鉱業所	60,000	4.8	70	6.6	—	—	6)
40-3-14	日高山脈・札内川上流	300,000	5.6	700	8.5	6	—	7)
40-4-15	夕張市	300	2.5	20	3.8	1	—	8)

#### IV. あとがき

なだれの運動の基本的なエネルギー機構をしらべるために、単純化された斜面を滑落する雪塊の運動およびエネルギー状態について考察がなされた。

なだれの運動に対する抵抗が速度の増加函数である時は、雪塊は斜面条件 ( $\theta, k$ ) によってきまる最終速度  $V_{\#}^*$  を越すことができない。この見地から、ある斜面条件のもち得る最大運動エネルギーにより破壊力階級を定義した。これは、ながれ型の旧雪表層なだれ、および全層なだれについては、近似的に適合すると思われる。しかし、爆発的ななだれ風を伴うけむり型の新雪表層なだれについては、又、別の考慮がなされなければならぬ。

又、なだれの量的な規模やエネルギー規模を表示するために質量階級、ポテンシャル階級を定義し、過去のなだれについての階級例をあげた。

この考察一般にあたって有益な助言を戴いた藤岡敏夫教授、吉田順五教授および若浜五郎助教授に、又、特になだれ風について懇切な示唆を戴いた小笠原和夫教授に深い謝意を表する。

#### 文 献

- 1) 萩原尊礼 1945 振動測定, 宝文館, 東京, 348 pp.
- 2) 荘田幹夫 1965 Appendix to "An Experimental Study on Dynamics of Avalanching Snow". Snow Research Station of Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways. 5 pp.
- 3) 小笠原和夫 未発表
- 4) 福山幹基 1963 宗谷本線(下平陸橋) なだれ事故について. 雪氷, **23**, No. 3, 28-29.
- 5) 吉田順五・他 1963 北海道日高の雪崩調査報告. 低温科学, 物理篇, **21**, 75-94.
- 6) 藤岡敏夫・他 1965 積丹半島古平雪崩調査報告. 低温科学, 物理篇, **23**, 129-136.
- 7) 清水 弘・他 1966 1965年札内川なだれの調査報告. 低温科学, 物理篇, **24**, 221-238.
- 8) 藤岡敏夫・他 未発表

### Summary

For the convenience of statistics of avalanche, a tentative definition of magnitudes of avalanche was proposed through a simple model of snow slide.

It was supposed that a snow block of mass  $m$  started to slide down the slope AB, declination of  $\theta$ , from the point A of Fig. 1, and stopped at C on the horizontal plane BC. Resistance to the motion of the snow block was supposed to be proportional to the velocity of the snow block. Then the motion of the snow block may be described by equations (1), (2) and (3) for the slope, (6), (7) and (8) for the horizontal plane respectively. Under prescribed assumptions, the snow block sliding down on the slope must have a terminal velocity if the slope is sufficiently long, and then must continue the motion of a constant velocity. Practical terminal velocity of the snow block was tentatively selected as 90% of theoretical value (4), and sliding distance necessary to get it was given by equation (5). All way down from this point, the snow block keeps a constant kinetic energy of  $\frac{1}{2} m V_r^{*2}$ ,  $V_r^*$  is the practical terminal velocity, and it is the limit of destructive energy of the snow mass for this slope. Energy diagrams for three cases of constant slope were illustrated by Fig 2.

- (a) With no destruction along the course.
- (b) With a destruction at the upper part of the slope.
- (c) With a destruction at the lower part of the slope.

Maximum running distance of the snow block on the horizontal plane after this slope was given by equation (10).

This discussion was conducted under an assumption of the resistance to the motion of the snow block could be expressed by an increasing function of velocity.

Three magnitudes describing scales of an avalanche were proposed as followings :

#### 1. Mass Magnitude (M.M.)

This is the measure of mass of avalanched snow, taking common logarithm of it (Fig. 3).

$$\text{M.M.} = \log_{10} m \quad (13)$$

where  $m$  : mass of avalanched snow, in ton.

#### 2. Potential Magnitude (P.M.)

This is the measure of total works done by avalanched snow consuming its potential energy (Fig. 4).

$$\text{P.M.} = \log_{10} mgh_0, \quad (14)$$

where  $g$  : acceleration of gravity.

$h$  : vertical distance between the centers of gravity of avalanched snow in pre- and post- avalanching, in meter.

#### 3. Destructive Magnitude (D.M.)

This is the measure of maximum destructive power by snow sliding for given mass of sliding snow and given slope.

$$\begin{aligned}
 \text{D.M.} &= \log_{10} \frac{1}{2} mg V_T^{*2} \\
 &= \log_{10} \frac{mg}{k^2} \sin^2 \theta
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

where  $V_T^*$ : practical terminal velocity  
 $k$ : resistance coefficient  
 $\theta$ : declination of slope

Further study is necessary to decide the form and value of  $k$ .

Some examples of classification of avalanches by M.M. and P.M. were given by the table 1. As a result, the values up to 6 for M.M. and up to 9 for P.M. are big enough to express the scale of usual avalanche.

We have to pay a particular attention to the destructive power by avalanche wind. Ogasawara<sup>2)</sup> has suggested a mechanism of generating the avalanche wind by airborne type of surface avalanche of new snow. He treated this type of avalanche as a compressive heavy fluid, and suggested the avalanche wind could be generated explosively after adiabatic compression when the avalanche hit barrier. This also should be a very important and interesting problem to be studied.