



Title	積雪の硬度 I
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 19, 119-134
Issue Date	1960-12-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17971">https://hdl.handle.net/2115/17971</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p119-134.pdf



## 積 雪 の 硬 度 I\*

木 下 誠 一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 35 年 8 月受理)

### I. 緒 言

積雪の硬度は、積雪の基本物理量の一つで、積雪の中に剛体を押しこむときの抵抗力で表される。野外でも簡単に測定出来る方法として、黒田式硬度計<sup>1)</sup>、ラムゾンデ<sup>2)</sup>、Hardness meter<sup>3)</sup>、クラゲリスキーの方法<sup>4)</sup>が用いられている。これらの方法には、どれにもそれぞれの利点があるが、軟かい新雪から硬いしまり雪にいたる広い範囲にわたって、よい精度の結果を与えるわけにはいかないようである。筆者は取扱いが簡単で、しかも、広範囲にわたって精度のよい測定が行なえる方法を考案した。この方法については、一度紹介した<sup>5)</sup>ことがあるが、その後改良を加え、又外くの実験を試みたので、それについて述べる。

### II. 測 定 法

測定器は第1図に示してある。Aは直径1 cm、長さ50 cmの細長い真鍮の棒で、下端に直径3 cm、高さ4 cmの小さな円筒Bがついている。この円筒も真鍮で、同筒に棒をつけたものの目方は520 grである。堀出して平らにした雪の面に、薄い鉄の円板C(厚さ1 mm)をおき、その上に棒Aをのせて立てる。錘mは中央に穴のあいた真鍮の錘りで、穴を棒Aに通し、手で掴んで、ある高さで支える。もう一方の手では、Aの先端を軽く掴んで、棒が鉛直になるように保つ。錘りmを掴んでいる手をはなすと、mは棒Aを案内として落下して円筒Bの上面にぶつかり、その勢で全体が鉄円板と共に、雪の中にめりこむ。そのめりこんだ深さ、錘りmのはじめの高さ、錘りの目方、円板の直径から雪の硬度がきめられる。錘りmのはじめの高さは、Aにきざみつけた目盛で定める。

雪の上におく円板Cとしては、測定しようとする雪の硬さに応じて、直径20 cm、14 cm、10 cm、7 cm、5 cm、3.5 cmのものを用いる。これらの6種類の円板は、それぞれ面積が前のものの半分づつになつていて、直径20 cmの最大の板は、直径3.5 cmの最小の板の $2^5=32$ 倍の面積になつている。又錘りmとしては、1 kg、3 kgの2種の真鍮円筒を用いた。

円筒Bの上面から錘りmの下面までの始めの高さを $h$  cm、衝撃によつて凹んだ雪の穴の深さを $d$  cm、錘りの目方を $m$  kg、円板の面積を $S$  cm<sup>2</sup>、円板とA、Bの合計の目方を $M$  kg

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第574号

とすると、雪の硬度は次のようにして計算される。錘りの衝撃において、雪に与えられるエネルギー  $W_1$  kg·cm は

$$W_1 = m(h+d) + Md \quad (1)$$

である。雪の面から鉛直下方に距離  $x$  cm をとつて、錘りが棒や円板と共に雪の中に沈んで行く途中でうける抵抗力を  $F(x)$  kg とすると、この抵抗力がなした仕事  $W_2$  kg·cm は

$$W_2 = \int_0^d F(x) dx$$

である。緒言のはじめに述べた通り、雪の硬度は剛体を雪の中に押しこむときの抵抗力で表される。いま、棒 A、円筒 B、錘り  $m$  全体をひとつの剛体と考え、それが  $d$  cm 沈む間の抵抗  $F(x)$  の平均値を  $F$  で表すと、

$$W_2 = Fd, \quad F = \frac{1}{d} \int_0^d F(x) dx \quad (2)$$

$W_1$  と  $W_2$  は等しくなければならないから、

$$F = m \left( 1 + \frac{h}{d} \right) + M \quad (3)$$

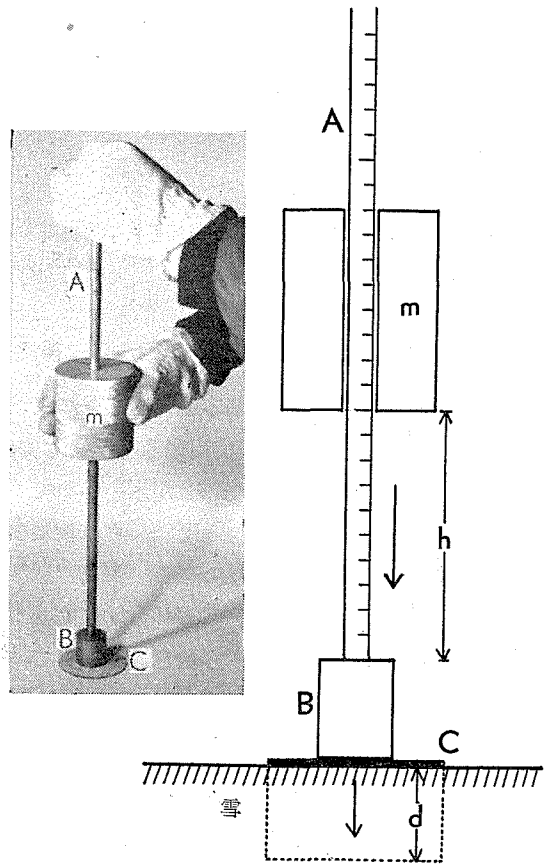
の関係が得られる。この  $F$  を円板 C の面積で割つた  $F/S$  を  $H$  とすると、 $H$  kg/cm<sup>2</sup> は雪の平均抵抗力の単位面積当りの値である。これを雪の硬度と名づける。即ち

$$H = \frac{1}{S} \left\{ m \left( 1 + \frac{h}{d} \right) + M \right\} \quad (4)$$

$m$ ,  $S$ ,  $h$  を適当に選ぶと、硬度  $H$  の値が数 gr/cm<sup>2</sup> の軟かい新雪から、 $H$  がその 10<sup>5</sup> 倍も大きい十数 kg/cm<sup>2</sup> の氷のように硬い雪にいたるまで、その硬度を精確に測定することが出来る。

### III. 測定 の 規 準

円板の大きさ、 $m$ 、及び  $h$  の値はほぼ次の第 1 表の規準で選ぶとよい。この表のうち、『錘りの重さ 0』は、錘り  $m$  を落下させないでも、円板 C の上に棒 A をたてただけで円板 C が沈む場合である。 $m=0$  なので、(4) 式によつて、 $H$  は、沈んだ深さ  $d$  には無関係に、 $H=M/S$  で表される。 $M$  は円筒 B と棒 A との目方 520 gr にひとしく、 $S$  は最大円板の面積 314 cm<sup>2</sup> なの



第 1 図 積雪硬度測定器

で、 $H$ の値は  $1.6 \text{ gr/cm}^2$  である。結局、硬度が  $1.6 \text{ gr/cm}^2$  より小さい雪は、すべて  $1.6 \text{ gr/cm}^2$  の硬度をもつものとして表されてしまうわけである。しかし、 $1.6 \text{ gr/cm}^2$  は人がのつたスキーの底面の圧力の10分の1にすぎない。円筒B、棒Aを使わないで、もつと目方の軽いものを円板の上にのせれば、 $1.6 \text{ gr/cm}^2$  以下の硬度も区別して測定出来る。

第1表 円板、錘り、錘りの高さの規準

雪の密度 $\rho$ ( $\text{gr/cm}^3$ )	円板の直径 $D$ (cm)	錘りの重さ $m$ (kg)	錘りの高さ $h$ (cm)
~0.1	20	0	
0.1 ~0.15	14, 10	1	0~10
0.15~0.2	10, 7	1	10
0.2 ~0.3	7, 5	1	10, 30
0.3 ~0.4	5, 3.5	1	30
		3	10
0.4 以上	3.5, 3*	3	30, 40

\* 円板なし、円筒Bのまま。

硬度は雪に固有な性質であるから、同じ雪についてなら、錘りの高さ  $h$  や円板の面積  $S$  を変えて測定したとしても、つねに同じ硬度の測定値が得らるべきである。このことを調べるため、同じ雪に、 $h$  と  $S$  を変えた測定を行なつた結果、第2表に示すように、ほぼ同じ硬度の値が得られた。ただ、この種の比較を行なうには、雪の硬度が深さによつて変化せず、一様である

第 2 表

錘りの高さ $h$ (cm)	円板の直径 $D$ (cm)	穴の深さ $d$ (cm)	硬 度 $H$ ( $\text{gr/cm}^2$ )
1	5	0.5	310
4	5	2.2	290
9	5	4	340
16	5	5.7	390
4	3.5	6	350

ることが必要である。さもないと、雪にあげられた穴の深さが違えば、当然の結果として、硬度が異なることになる。それで、この比較実験は、自然積雪から切取つた大きな雪塊を横にして、層構造が鉛直になるようにし、これに上から

衝撃を与えて行なつた。こうすれば、雪の硬度に鉛直の方向の変化はない。用いた雪は密度0.24、温度  $-5.5^\circ\text{C}$  のしまり雪であつた。

第2表によると、錘りの高さを変えても、又円板の面積を変えても、硬度の値はほとんど同じではあるが、衝撃が強くと、雪の穴が深くなると、硬度の値が増す傾向がみえる。しかし、新雪からしまり雪まで、硬度の値が  $1\sim 10^5$  程度の広い範囲で変ることを考えると、上のような衝撃の強さの違いで起る硬度の測定値の違いは、小さなものとして、考慮しなくてもよいであろう。

一般に、積雪は層状構造をなして、第2図にも示してあるように、下の層になる程、硬くなるのが普通である。従つて、衝撃で作られる穴の深さの上と下では、雪の硬さが違い、測定で得られるのは、穴の深さの間の平均の硬度である。この平均硬度は、穴が浅ければ浅いほど、穴の深さの間にある雪の硬度そのものに近くなる。それゆゑ、穴の深さ  $d$  の測定が正確に求められる限りにおいて、穴は出来るだけ浅くするのがよい。筆者の経験によると、4 cm 位の深

さにとどめるのが適当のようである。

#### IV. 測定結果

1958, 1959, 1960 の3回の冬に、北海道北部の深雪地帯にある母子里(もしり)において、上述の方法で硬度を測定した。積雪表面から色々な深さで、その深さより上にある雪を取去つて水平な面を出し、その面について硬度を測り、硬度と深さとの関係を求めた。その結果の一例を第2図に示す。深さ2mの積雪の最上層の新雪の硬度 $H$ は数 $\text{gr/cm}^2$ の程度であるが、 $H$ は深さと共にまし、地上30cm位で最大値の十数 $\text{kg/cm}^2$ に達している。しかし、その下にある最下層のざらめ雪では急に小さくなる。第2図には、又、黒田式硬度計やラムゾンデを用いて同時に測定した値も、それぞれ曲線 $K$ 、凹凸線 $R$ で示してある。

色々な深さの水平面を作らなくても、深い所の硬度が測れるのがラムゾンデの特徴で、凹凸線はそのようにして求めたのである。しかし、色々な深さで作つた水平面についても、ラムゾンデの測定を行なつてみた。凹凸線にそつて分布している白円印が、そのようにして得た値である。黒田式硬度計はすべてこの作られた水平面について行なつた。筆者の硬度計、黒田式硬度計、ラムゾンデによる値の間の関係については、後で論ずる。

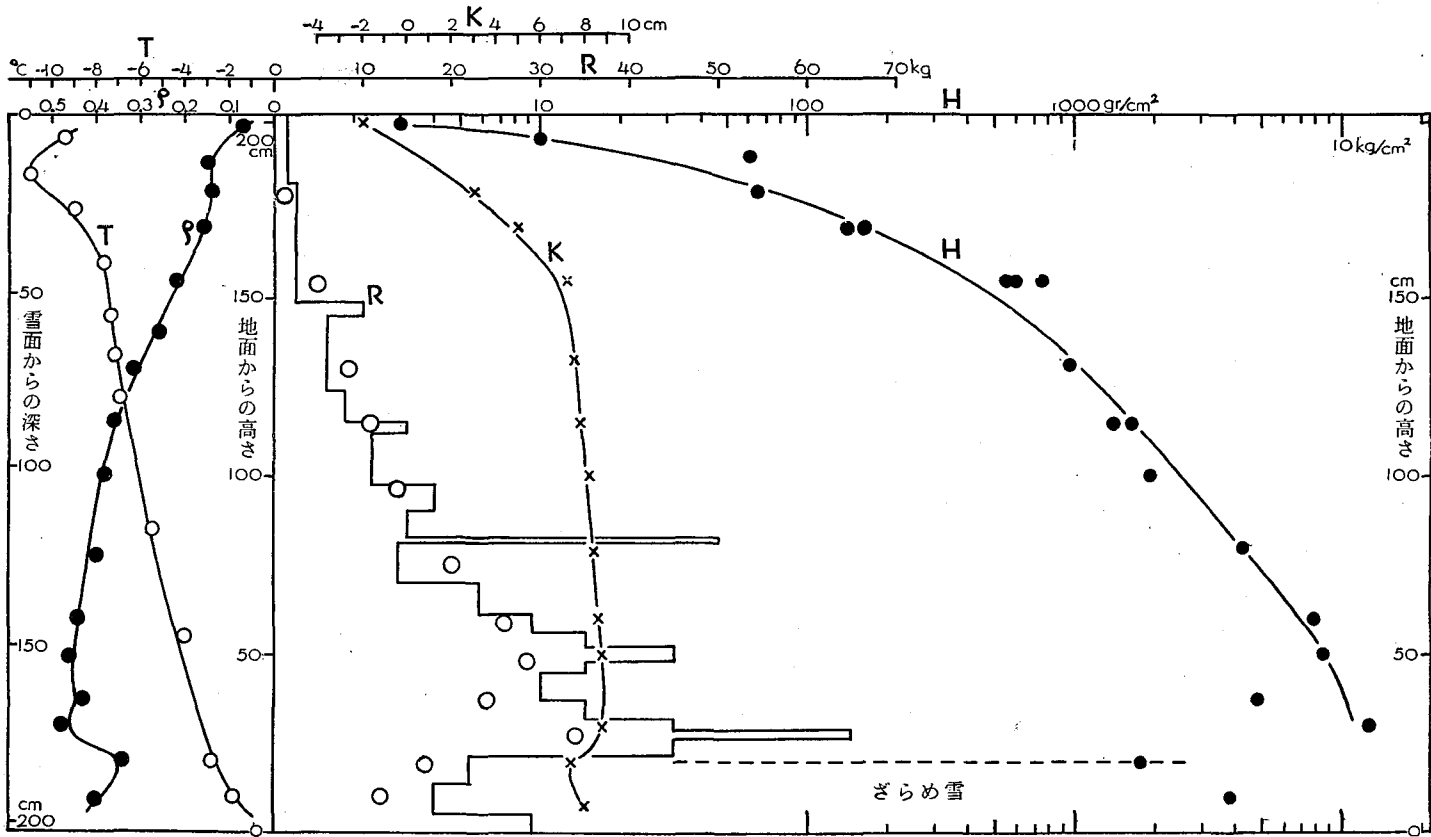
色々な密度のしまり雪について、筆者の硬度計で定めた多くの硬度の値 $H \text{ gr/cm}^2$ と密度 $\rho \text{ gr/cm}^3$ との関係を、両対数グラフで表したのが第3図である。この図の白円(雪の温度 $-9^\circ \sim -5^\circ\text{C}$ )と黒円(雪の温度 $-5^\circ \sim 0^\circ\text{C}$ )とは、母子里の2m余りの深い雪について得たものである。一方、筆者は、札幌において、1950年来この硬度計と同じ原理で、雪の衝撃破壊の実験を数多く行なつた。真鍮円筒の下面に圧力測定器をつけて、雪の上に落し、同筒が雪の中にめりこんでとまるまでの雪の抵抗力を電磁オツシログラフで記録したのである。詳しい報告は、筆者の論文『衝撃による積雪の破壊 I<sup>9)</sup>, II<sup>9)</sup>, III<sup>7)</sup>』にある。そのとき得られた硬度の値のうちから、代表的なものを選んで、第3図に $\times$ 印(雪の温度 $-5^\circ \sim 0^\circ\text{C}$ )と三角印(雪の温度 $0^\circ\text{C}$ , 湿つたしまり雪)とで示した。

同じ密度の雪に対しても、硬度はかなりのばらつきを示すが、乾いた雪だけに限ると、測定点は大体直線的に分布しており、 $H (\text{kg/cm}^2)$ と $\rho (\text{gr/cm}^3)$ との関係は次の式で表される。

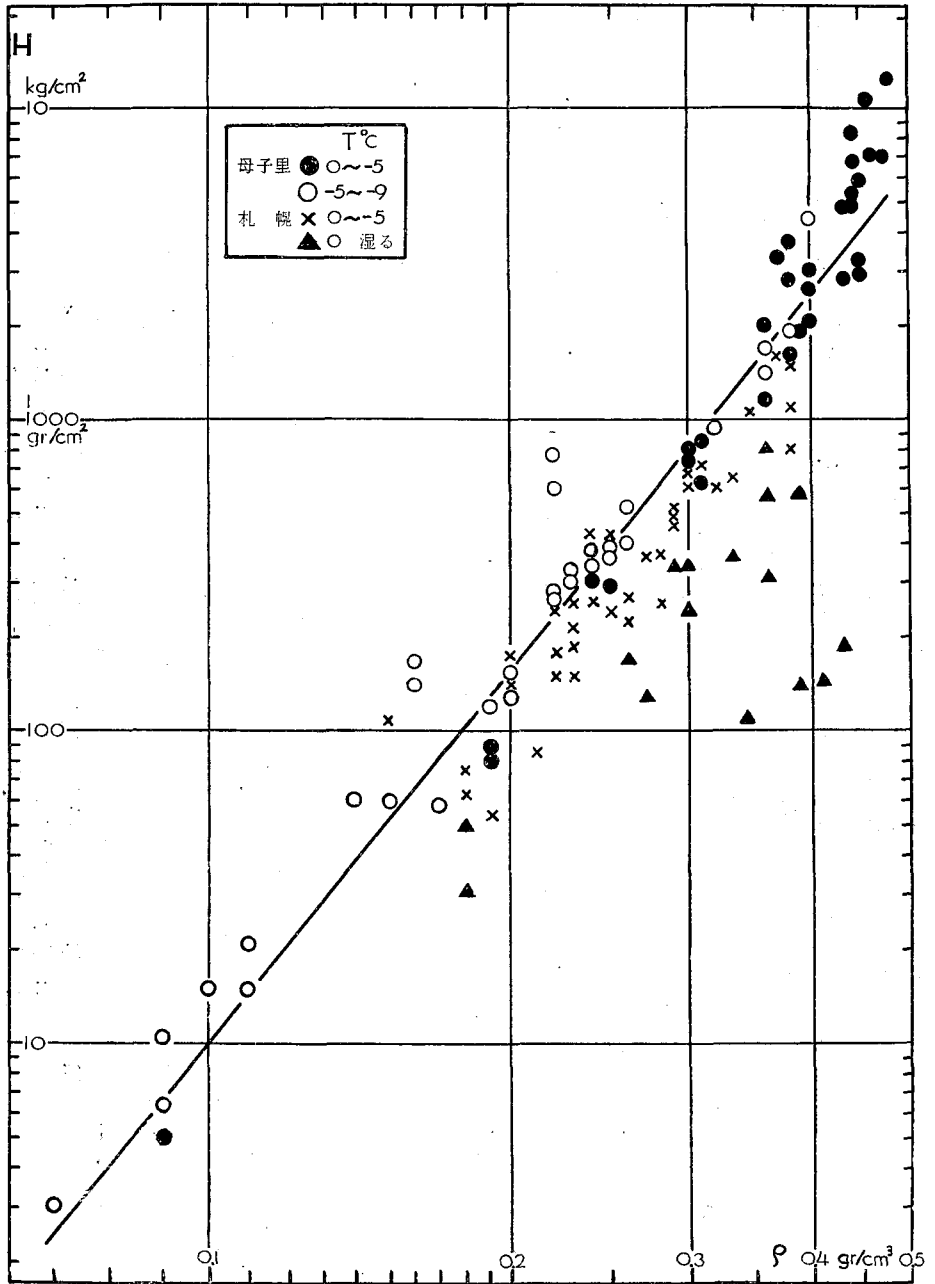
$$H = 100 \rho^4 \quad (5)$$

ただし、 $\rho$ の範囲は $0.07 \sim 0.47$ 、雪の温度範囲は $0^\circ \sim -9^\circ\text{C}$ である。白円の雪は、黒円、 $\times$ 印の雪より温度が低く、硬度がいくぶん大きい傾向はうかがえるが、その温度による違いは余り大きなものではない。しかし、三角印の位置から解るように、湿つた雪の硬度は乾いた雪の硬度よりかなり小さい。

筆者は、積雪の円柱を定速度で圧縮する実験<sup>9), 10)</sup>も行なつた。それによると、圧縮速度が限界値をこえると、雪の柱はその上下の端面で破壊を起し、破壊された部分は粒となつて、周りにはじき出される。そのときの雪の抵抗力は激しく変動するが、抵抗力の最大値、即ち破壊強度 $p^*$ は同じ温度、同じ速度では、密度 $\rho$ の3乗にほぼ比例する。それに対して、衝撃に



第2図 1960年2月22日母子里における積雪の深さによる硬度、密度、温度の変化。  
 H: 筆者の硬度計による硬度, K: 黒田式硬度, R: ラムゾンデによる硬度 (凹凸線は繰返し衝撃による値, 白円印はその深さの雪面を掘り出して1回の衝撃を加えたときの値), ρ: 密度, T: 温度.

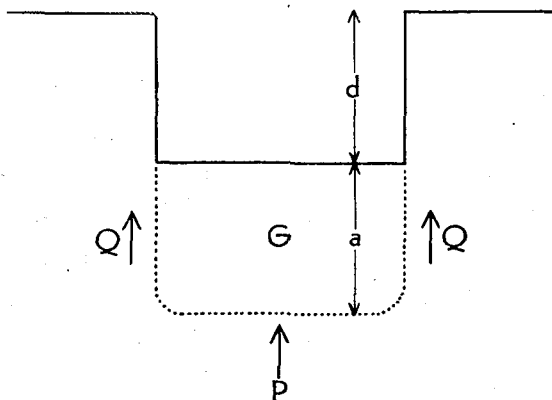


第3図 硬度  $H$  と密度  $\rho$  との関係。しまり雪。

対する雪の平均抵抗である硬度  $H$  は、(5)式に示したように  $\rho$  の4乗に比例している。この衝撃の場合、錘りは  $1 \sim 2.5$  m/sec の速度で雪にぶつかり、雪の中にめりこむにつれ、速度を落して遂に止まる。この間の速度の平均をとると、数十 cm/sec である。上に述べた定速度圧縮の実験での圧縮速度は、 $1$  cm/sec 以下であつた。このようにふたつの場合では、圧縮速度が非常に違うのであるから、雪の抵抗と雪の密度との関係が、両方の場合で同じでないとしても、必ずしも矛盾しているとはいわれぬ。実際、定速度圧縮の文献(9)の第6図によると、限界速度の  $10$  mm/min ( $0.16$  cm/sec) 以上  $60$  mm/min ( $0.1$  cm/sec) 附近までの圧縮速度範囲では、破壊強度  $p^*$  は速度とともに減少するが、 $60$  mm/min 以上の速度に対しては、速度の増にもかわらず一定となる。

このように、確かに、雪の抵抗は圧縮速度によつて変わるものなのである。ところが、その変りかたは、速度増大と共に抵抗が減るような変りかたであるにも拘らず、速度の大きい衝撃のときの抵抗、即ち硬度  $H$  の方が、速度の小さい定速度圧縮の場合の抵抗よりは大きい。例えば密度  $0.45$ 、温度  $-4.5^\circ\text{C}$  のしまり雪を  $120$  mm/min ( $0.2$  cm/sec) の定速度で圧縮するときの破壊強度  $p^*$  は  $0.8$  kg/cm<sup>2</sup> であるのに対して、筆者の硬度計によつて同じ雪に対して得られる硬度  $H$  は、 $4$  kg/cm<sup>2</sup> である。 $H$  の方が5倍も大きい。この矛盾は、完全にではないが、次のように考えると、その一部は除かれる。

筆者の硬度計の測定で、衝撃を加えると、第1図の円板 C は雪の中にめりこみ、深さ  $d$  の穴を作るが、この場合破壊圧縮されるのは、この穴の中に最初にあつた厚さ  $d$  の雪だけではない。穴の底の下には、第4図に点線で示した範囲 G に、破壊された雪が圧縮されてつまっている。結局、雪の表面から、この圧縮部分 G の底までの間にあつた雪が、硬度計によつて破壊されたわけである。雪の柱を定速度で圧縮するときには、前に述べたように、破壊は柱の上下端面で起り、破壊された雪は、まわりにとびちる。硬度計の場合には、円板 C の下面に接する雪がまず破壊されるが、破壊された雪はまわりにとびちることは出来ず、円板 C の下に圧縮される。そして、次には、この圧縮された雪の下面に接する雪が破壊されて、そこに蓄積される。



第4図 衝撃で凹んだ雪の断面の模型図

このようにして、硬度計によつて与えられる衝撃が終つたときには、円板 C の下に、第4図に示すような圧縮部分 G が出来るわけである。従つて、この硬度計の場合を、定速度圧縮の場合と比較するには、圧縮面は、雪の表面から穴の底までではなく、圧縮部分の下面まで進むと考えなければならない。それで、雪の平均抵抗、即ち、圧縮面が  $1$  cm 進む間に、圧縮面が費さなければならない仕事は、衝撃が与えた仕事を  $d$  で割つた(2)式の  $F$

ではなく、 $d+a$ で割つたものでなければならない。ここに、 $a$ は圧縮部分Gの厚さである。従つて、定速度圧縮の実験結果と比較すべきものは、 $H' = \frac{d}{d+a} H = \frac{d}{d+a} \left( \frac{F}{S} \right)$ である。 $a$ は密度が $0.3 \text{ gr/cm}^3$ までの雪では $d$ と同程度、これより大きい密度の雪になると、 $d$ より大きくなり、 $d$ の2倍に達することすらある。それ故、 $H'$ は $H$ の $1/2$ から $1/3$ の大きさである。定速度圧縮の場合の抵抗は $H$ の $1/5$ 位であるから、 $H'$ はなお、定速度圧縮抵抗よりは大きい。しかし、 $H$ に比べれば、 $H'$ の方が定速度圧縮抵抗にだいぶ近い。

## V. 他の硬度計との比較

第2図には、筆者の硬度計、黒田式硬度計及びラムゾンデを用いて、同じ雪について測定した結果が示してある。黒田式硬度とラムゾンデ硬度は、深さによつて余り変らないが、筆者の硬度計による硬度は、深さと共に格段に大きな変化を表している。

ラムゾンデは、第1図の円筒Bの下に、先端が頂角 $60^\circ$ 、高さ $3.5 \text{ cm}$ の円錐になつている細長い棒をつないだものである。棒Aにそつて、錘り $m$ を何度も落して、次々に衝撃を加える毎に、ラムゾンデの先端は雪の中に入つて行く。衝撃毎に増大する深さ $d$ を測ると、それぞれの深さにおける抵抗力 $F$ が(3)式から求められる。この $F$ の値をラムゾンデ硬度 $R$ とする。雪が深いときには、更に棒をつぎたすことが出来るようになってゐる。測定しようとする雪の面を掘り出さなくてもよいのが大きな利点である。しかし、第2図の凹凸線によつて示された測定結果からも解るように、積雪表面近くの軟かい雪の硬度は細かく測ることが難しい。

黒田式硬度計は、頂角 $90^\circ$ 、高さ $10 \text{ cm}$ 、重さ $1 \text{ kg}$ の円錐で、これを頂点を下にして、その上面を雪面上 $20 \text{ cm}$ の高さに支え、そこから雪の上に落す。雪の中にめりこんだ円錐の上面が雪面から $K \text{ cm}$ の高さにあるとき、この $K$ を硬度とする。第2図にみられる通り、ラムゾンデとは違つて、表面近くの軟かい雪の硬度の変化をよく表している。しかし、雪面から $70 \text{ cm}$ 以上の深さの密度 $0.3$ 以上の硬い雪に対しては、硬度 $K$ の値は $7.5$ から $8.8$ まで、僅かな違いを示すだけである。筆者の方法による硬度 $H$ の値は、ここで $1.3 \text{ kg/cm}^2$ から $13 \text{ kg/cm}^2$ までと十倍も違う。筆者の方法による硬度 $H$ と、黒田式硬度 $K$ との関係については、筆者の論文<sup>7)</sup>を参照されたい。

黒田式硬度計も、ラムゾンデも、雪の中に押込まれる剛体が先のとがつた円錐形であるという点で、筆者の硬度計と違う。これに対してHardness meterは、筆者の方法と似ている。雪の上に円板を置き、この円板をHardness meterで $30 \text{ cm/sec}$ の速さで雪の中に押しこみ、そのとき、Hardness meterのスプリングに現われる抵抗力を、雪の硬度とする。又、クラゲリスキーの方法では、雪の上に、頂角 $45^\circ$ 、高さ $13 \text{ cm}$ の円錐に荷重をのせておく。雪の表面に作られる穴の面積で円錐による荷重を割つた値を、雪の硬度とする。筆者は、これら2つの方法は使わなかつたので、それらとの比較はここでは行なえない。

## VI. 繰返し衝撃による雪の硬度の増大 (附 深雪に作られる足痕)

筆者の硬度計で、いちど雪に衝撃を加え、そのままの位置で又衝撃を加えるというようにして、繰返し衝撃を与え、衝撃の回数と、それぞれの回に得た雪の硬度  $H$  との関係を図 3 表に示す。積雪は層構造をもち、層は深くなるほど硬くなる。そして、硬度計は衝撃が繰返される程、深く沈んでいるので、衝撃の回数が進むと共に、硬度がますますは当然である。しかし、自然積雪から切り出した雪塊を横倒しにして、上になつた面について硬度を測つても、衝撃を繰返す毎に、硬度  $H$  は大きくなる。この場合には、層構造が鉛直になつていたので、雪の硬度は鉛直方向に変化しない筈である。第 3 表の硬度はこのようにして得た値である。用いた雪塊の密度は 0.23 であつた。表に明らかに現われているように、深さによつて硬度  $H$  は一定な筈なのに、衝撃回数がますますつれ、次第に硬度の値はまして行く。この原因は、次のようなことにあるものと考えられる。

第 3 表

回数	硬度 $H$ (gr/cm <sup>2</sup> )	積雪表面から測つた凹みの深さ $d$ (cm)	圧縮部分の厚さ $a$ (cm)
1	200	4.1	3.5
2	290	5.7	4.5
3	370	7.2	5.5
4	420	8.5	6
5	440	9.7	6.5

まず錘を落して、第 4 図のように雪が  $d$  だけ凹んだとすると、その下には必ず破壊してつまつた雪の部分、即ち、圧縮部  $G$  が出来る。二度目の衝撃では、圧縮部分  $G$  の下面から破壊が始まる。圧縮部底面で起る雪の破壊のための抵抗力  $P$  は、初回の衝撃で起るものと同じであるが、二度目の衝撃で圧縮部が動き始めるためには、圧縮部側面と、それに接する外側の雪との結合を破る必要がある。そのため、大きな抗剪抵抗力  $Q$  が現われる。筆者は、この抗剪抵抗力の存在を、衝撃の短い時間における抵抗力の変化を電磁オツシログラフで記録することによつて確めた(このことについては、文献 7)の筆者の論文『衝撃による積雪の破壊 III』の第 17 図を参照されたい)。繰返し衝撃では、錘り  $m$  の落下エネルギー  $W_1$  がこの抗剪抵抗力に打勝つために使われるので、衝撃による硬度計の沈下  $d$  が小さくなる。その結果として、たとえ雪の強さに変りはないとしても、硬度  $H$  が初回に比べて大きな値となつて現われる。

第 5 図 (b) は圧縮部分の断面に色水をかけた写真である。黒い所が圧縮部分で、その底は円味をおびている。繰返し衝撃では、全く同じ鉛直線上に各衝撃が加わるとは限らないであろう。それで繰返し衝撃の度に、圧縮部分は横の方にもずれて、水平断面が広がる。その結果、第 4 図の力  $P$  をうける面が広くなり、これもまた、 $d$  を減少させ、実際の硬度よりも大きな  $H$  の値を与える原因となる。

円錐形の先端をもつラムゾンデの場合の圧縮部分も、第 5 図 (a) のように、その底は円い。始めの衝撃では円錐面から破壊が始まつたのに、二度目の衝撃からは、円い圧縮部分の境界から破壊が始まり、先が尖つているための雪を貫き易いという効果は減つてくる。又、衝撃がく

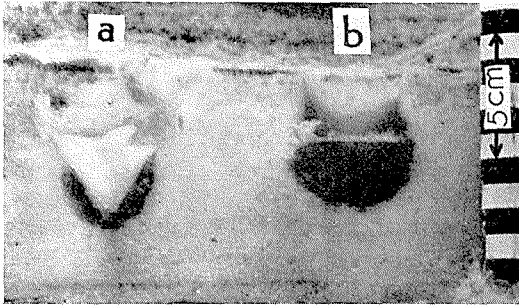
り返されるにつれ、圧縮部分は横の方向に広がり、圧縮部の水平断面は益々広くなるであろう。第6図の左側の写真は、13回、繰返し衝撃を与えて、ラムゾンデを雪の中に沈め、出来た細い深い穴にそつて、断面を作り、色水をかけたところである。各衝撃毎にラムゾンデの先端は、1から13までの深さで停止し、その停止位置で次の衝撃が加えられた。衝撃がある度に、圧縮部が作られる筈だから、13ヶの圧縮部が認められてよいのだが、第6図(a)にみられる通り、圧縮部の数は13ヶよりははずつと少ない。深さ45cmのところまでには、1, 2, 3, 4, 5, 6と6回の衝撃があつた。しかし、そのときどきに作られた圧縮部分は、ラムゾンデの先端に押し下げられて、6の位置に集積してしまつている。しかも、集積圧縮部は側方へふくれだし、いかにも丈夫そうに見える。次の7回目の衝撃で、ラムゾンデは、この集積圧縮部を貫いたが、衝撃エネルギーの相当な部分が、その貫通のためにも費されたに相違ない。その結果として雪の硬度としては、実際の硬度よりも遙に大きな値が得られる。第6図(b)に、そのときのラムゾンデ硬度  $R$  の値が示してあるが、事実、1, 2, 3, 4, 5, 6と硬度  $R$  が次第に大きくなつて、7回目には、非常に大きな値に達している。しかし、この7回目の衝撃で、集積した圧縮部が貫通されたため、次の8回目には、7回目の硬度の値の約半分の硬度の値にまで減つている。このことは、7回目の硬度が、実際の硬度よりも大きな値を表しているのではないかと疑わせるのに十分である。

前に述べたように、筆者の硬度計でも、衝撃を繰返すにつれて、硬度は実際の値とかけはなれてくる。ラムゾンデの場合、繰返し衝撃を行なうにしても、衝撃毎の圧縮部がその位置にとどまつて、次の衝撃で必ず貫かれるというのならば、その深さでの雪の実際の硬度と測定値との間に、規則的な関係が存在し得るであろう。しかし、ここに述べたような圧縮部の集積があるとすると、そのような規則的な関係は期待されなくなる。第2図に、雪面を掘出して、1回だけ衝撃を加えて測つたラムゾンデ硬度  $R$  の値を、白円印で示してあるが、その深さにおける繰返し衝撃で得られた  $R$  の値(凹凸線)とは、大分違つている。

二度目の衝撃で硬度がますことは、深雪中に作られる足痕やスキーのスプールにおいて、通常経験されることである。即ち、一度出来た足痕を更に凹ますには、初めに足痕を作るよりも大きな力が要る。第7図は足痕の着色断面の写真である。一般に、足痕は、2段階の圧縮で出来る。第1段階は足をつくときの踵による圧縮で、第2段階はふみ出すときの、爪先による圧縮である。歩くときは踵による圧縮が強く、走るときは逆に爪先による圧縮が強い。

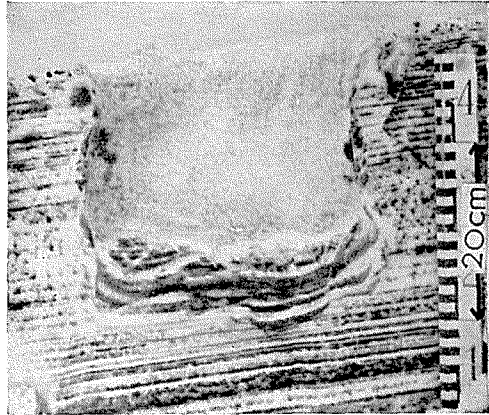
筆者の硬度計を用いて、足痕やスキーのスプールと同じだけ、雪を凹ますような衝撃を加え、その測定値から、足痕やスプールが出来るときの平均の圧縮抵抗、即ち足痕やスプールの深さに関しての平均の硬度  $H$  を求め、第4表に示した。

式(1)(2)(3)(4)から解るように、硬度  $H$  は衝撃で雪を破壊圧縮するのに必要なエネルギー  $W (= W_1 = W_2)$  を  $d$  と  $S$  とで割つたものである。従つて、水平単位面積の雪を  $d$  だけ凹ますのに要するエネルギーは  $Hd$  に等しい。これから、例えば足痕を作るのに必要な衝撃エネルギー  $A$  は、 $Hd$  に靴の底の面積  $300 \text{ cm}^2$  をかけたものとして求められる。第4表の衝撃エネルギー

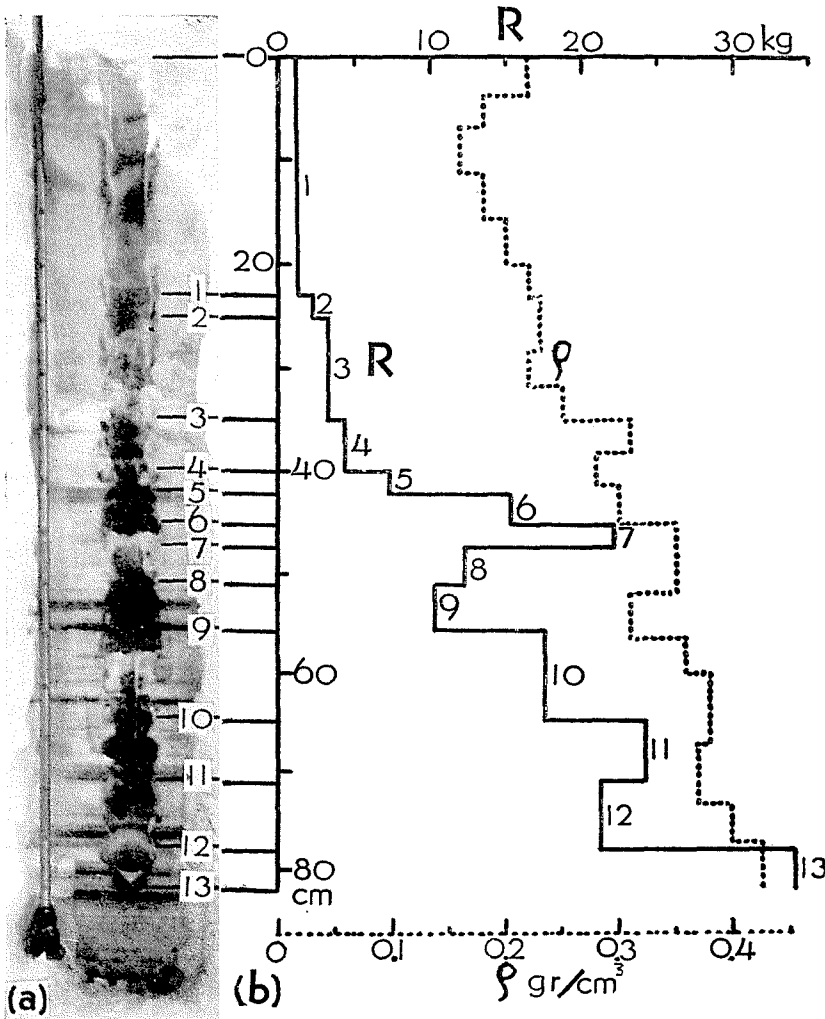


第5図 衝撃で凹んだ積雪の着色断面

- (a) ラムゾンデによるもの
- (b) 筆者の硬度計によるもの

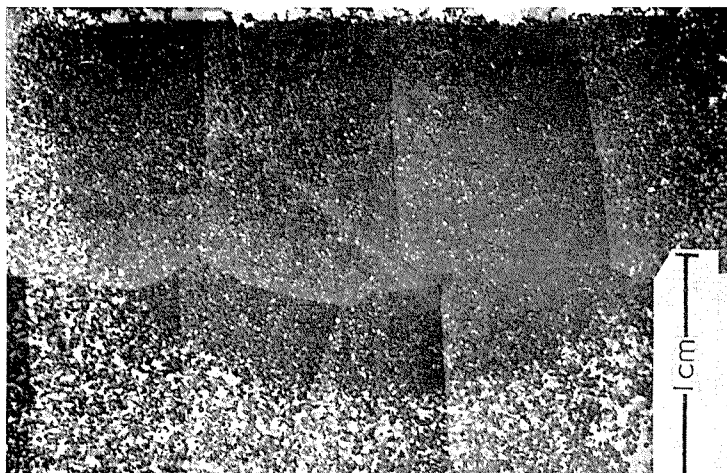


第7図 深雪に作られた足痕の着色断面



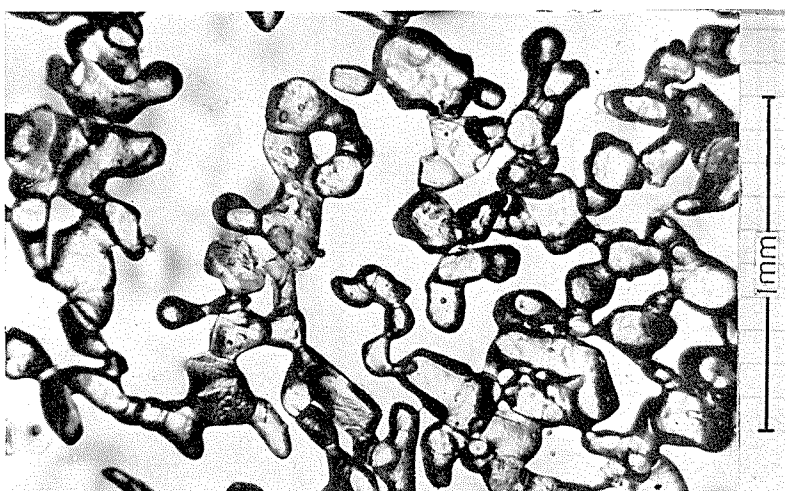
第6図

- (a) ラムゾンデを用いて、13回繰返し衝撃を加えたときの、雪の穴の着色断面。数字を附した線は、各衝撃毎のラムゾンデの先端の位置を示す。
- (b) そのときのラムゾンデ硬度  $R$  と雪の密度  $\rho$ 。



第8図

衝撃で凹んだ雪の断面の薄片。薄片の厚さ0.7 mm 位。密度0.27のしまり雪。黒い部分が圧縮部分。



第9図

上の薄片を更に薄くする。厚さ0.1 mm 位。圧縮部分の下の破壊を受けていない部分。雪粒同士がつながっている。



第10図

同じ薄片の圧縮部分。雪粒間のつながりが断ち切られている。スケールは第9図と同じ。

とは、このようにして求めたものを表す。スキーの場合の衝撃エネルギーとしては、足痕と比較するため、一步の歩幅に相当する 50 cm の長さのスプールをとつて、それを作るのに要するエネルギーを用いた。Hd に 50 cm の長さのスポールの面積  $50\text{ cm} \times 20\text{ cm} = 1000\text{ cm}^2$  (20 cm は両足のスキーの幅) をかけたものである。表の値が示すように、一度出来た足痕の上を歩く場合を除くと、一步あるために足が雪に与える衝撃エネルギーは、同じ一步をスキーで進むときに必要な衝撃エネルギーより 2, 3 倍大きい。

第 4 表の測定値から、まとめて次のような結果が得られる。

- (1) 雪の中を歩くよりも、走る方が、平均硬度も大きく、一步毎に費される衝撃エネルギーも大きい。
- (2) 一度出来た足痕の硬度は非常に大きく、その上を歩くときの衝撃エネルギーは非常に少ない。
- (3) スキーでは、速度の速い方が、スプールを作るのに要する衝撃エネルギーが少ない。
- (4) 凹みの平均の硬度は、大体静荷重に等しい。静荷重の値は、足痕では、約  $200\text{ gr/cm}^2$ 、スキーでは、約  $16\text{ gr/cm}^2$  である。

なお、このときのスキーの実験については、藤岡<sup>1)</sup>の詳しい報告があるので、それを参照されたい。

**VII. 雪の硬度と組織との関係**

錘りを雪に落す衝撃で、雪を凹ますとき、雪の構造や組織がどのように変わるかは、興味ある問題である。第 5 図のような色水による

第 4 表

1958年 (月日)	速 度 (m/sec)	凹 み d (cm)	圧縮部分 の厚さ a (cm)	雪の密度 $\rho$ gr/cm <sup>3</sup>			凹みの平均 硬度 H (gr/cm <sup>2</sup> )	硬度計から求めた 衝撃エネルギー Hd 積 (kg·cm <sup>2</sup> )	衝撃エネ ルギー A (kg·cm)	黒田式硬 度計による表面の 硬度 K
				表 面	凹みの底	圧縮部分 の底				
3月7日 12日	歩き, 0.7	41	13	0.025	0.17	0.26	102	4.2	1260	-13
	歩き, 0.7 上の足痕を 再び歩く 走り, 3	20 20~22 26	13 15 13	0.30* 0.25	0.20 0.23	0.27 0.28 0.30	160 700 250	3.2 0~1.4 6.5	960 0~420 1959	+7  +6.8
3月7日 8日 10日 12日	5.7	20	5.3	0.03	0.06	0.12	16	0.32	320**	-12
	2.1	33	6	0.05	0.19	0.20	30	0.99	990	-9
	5	13	11	0.14*	0.13	0.12	33	0.43	430	-1
	10	5	7.5	0.25*	0.16	0.16	48	0.24	240	+6

\* は厚さ 3 cm 程のざらめ雪. \*\* スキーのときの衝撃エネルギーは 50 cm の走行距離についての値である。

着色によつても、錘りの落下で圧縮された部分と、そのまわりの雪との差別はつけられるけれども、雪の顕微鏡的組織がどのように変つているかは解らない。しかし、最近考案された簡単な積雪薄片製法<sup>12)</sup>で、雪の薄片を作れば、細かい顕微鏡的組織も見ることが出来る。密度 0.27、温度  $-5^{\circ}\text{C}$  の雪の上に、底面の直径 3 cm の筆者の硬度計で、2 cm の高さから 1 kg の錘りを落したとき、深さ 2 cm の穴が出来た。第 8 図は、この穴の中心を通る面にそつて作った薄片の接写写真である。黒い部分が圧縮部分である。この薄片を更に薄くし、その一部を顕微鏡で拡大してみたのが、第 9 図、第 10 図である。第 9 図は、圧縮部分から外れて、その下にある破壊してない部分の組織である。雪粒は互に連結して、普通の状態にある積雪の組織と変りない。第 10 図は圧縮部分の薄片である。各雪粒は互に接触してはいるが、第 9 図にみられるような雪粒間の強固なつながりは殆んどない。また、第 9 図と比べてみると、粒子間の連結は、主として、もと氷の単結晶領域の境界、即ち結晶粒界のあつたぐびれた箇所<sup>13)</sup>で断ち切られていることが解る。このように、衝撃が雪粒間の連結を殆んど完全に断ち切るものであるとすれば、雪の硬度は、雪粒間の連結を断つのに要するエネルギーによつて、定められるものかも知れない。

第 8 図の衝撃で費された全衝撃エネルギー  $W$  は  $5.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  であつた。圧縮部分は、半径 1.7 cm の半球で、はじめにこの圧縮部分と凹んだ穴とにあつた雪が、破壊されたわけである。穴の容積と圧縮部分の体積との和は  $23.6 \text{ cm}^3$  である。従つて、この  $23.6 \text{ cm}^3$  で上の  $W=5.4 \text{ kg}\cdot\text{cm}$  を割ると、 $1 \text{ cm}^3$  の雪を破壊するのに費されたエネルギー  $w$  として、 $2.3 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$  が得られる。自然の状態のままの同じ雪の薄片について、結晶粒界の面積を求めたら、平均  $6.9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$  であつた。(この雪は今冬(昭和 35 年)1 月 17 日に降つた雪で、上の実験は、1 月 26 日に行なわれた。雪の顕微鏡的組織の色々な量的表現については、筆者の別の論文<sup>3)</sup>を参照されたい。)又、結晶粒界の数は、雪の  $1 \text{ cm}^3$  につき、 $32 \times 10^4$  個であつた。従つて、 $1 \text{ cm}^3$  の中にある結晶粒界の総面積は  $22 \text{ cm}^2$  になる。この結晶粒界が全部衝撃で分離されたとすると、氷の表面の面積は、この総面積の 2 倍、即ち  $44 \text{ cm}^2$  だけ増したことになる。それで、氷の表面エネルギーを  $a$  とすれば、この結晶粒界分離のために必要なエネルギー  $w_s$  は  $44 \text{ cm}^2$  と  $a$  との積で与えられる。大浦<sup>4)</sup>によると、氷の表面エネルギーは、 $-5^{\circ}\text{C}$  で  $90 \text{ erg/cm}^2$  である。従つて、 $w_s$  は  $4 \times 10^3 \text{ erg/cm}^3$  である。所が、先に示したように、 $1 \text{ cm}^3$  の雪を破壊する衝撃エネルギー  $w$  は、 $w_s$  の約 50 倍の  $2.3 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$  である。即ち、実際の衝撃に際しては、新しい氷の面を作るのに必要なエネルギーは、衝撃によつて与えられるエネルギーのうちのほんの一部にすぎない。一方、金属の圧縮においては、温度、変形量によつて違ふが、圧縮の間になされる機械的仕事の数%から 12% 位までのエネルギーが、内部に蓄積されることが知られている<sup>15)</sup>。従つて、この場合の雪の衝撃においても、連結を切られてばらばらになつた各雪粒の内部に、ある程度のエネルギーが蓄積されるものと考えられる。又、この他にも、これらばらばらの雪粒を、押しつめる際の摩擦等にも、相当量のエネルギーが費されるのであろう。

終りに、この研究に際し色々御指導をいただいた吉田順五教授、又、種々御助言をいただいた低温科学研究所雪氷研究グループの方々に、感謝の意を表します、又、野外実験に際し多くの便宜を与えて下さった北大演習林母子里看守所に、厚く御礼を申し上げます。なお、この研究に要した費用の一部は、文部省科学研究費によるものである。

## 文 献

- 1) Kuroda, M. 1929 Mechanical properties of snow layer. Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, Tokyo. **12**, 69.
- 2) Haefeli, R. 1933 Der schnee und seine Metamorphose. Kapitel II. Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Beiträge z. Geolo. Schweiz, Hydro., Lief. **3**, 63.
- 3) Gold, L. W. 1956 The strength of snow in compression. Journ. of Glaciology, **2**, 719.
- 4) Крагельский, И. В. 1945 О методике определения твердости и плотности снеговых покрытий. Физ.-мех. свойства снега и их использование в аэродромном и дорожном строительстве. М.-Л., 61.
- 5) 木下誠一 1955 衝撃による積雪の破壊 I. 低温科学, 物理篇, **14**, 95.
- 6) 木下誠一 1956 衝撃による積雪の破壊 II. 低温科学, 物理篇, **15**, 149.
- 7) 木下誠一 1957 衝撃による積雪の破壊 III. 低温科学, 物理篇, **16**, 119.
- 8) 木下誠一 1957 積雪における変形速度と二つの変形形式 (塑性変形, 破壊変形) との関係. 低温科学, 物理篇, **16**, 139.
- 9) 木下誠一 1958 積雪における変形速度と変形形式との関係 II. 低温科学, 物理篇, **17**, 11.
- 10) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学, 物理篇, **19**, 135.
- 11) 藤岡敏夫 1959 スキーの研究 (4). 低温科学, 物理篇, **18**, 59.
- 12) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学, 物理篇, **18**, 77.
- 13) 木下誠一 1960 ある積雪層の組織の変態過程 (薄片による観察). 低温科学, 物理篇, **19**, 111.
- 14) 大浦浩文 1953 ウイルソン霧函中の凝結核昇華核. 低温科学, 物理篇, **10**, 27.
- 15) Suzuki, T. 1949 The release of energy associated with crystal restoration process in cold-worked polycrystalline copper. Sci. Rep. Res. Inst. Tohoku Univ., **1**, 193.

## Résumé

Hard snow is thousands or more times as hard as soft snow. The author devised an instrument by which the hardness of snow could be measured accurately over a wide range of hardness. The appliances are shown in Fig. 1. A thin circular metal plate C (area:  $S \text{ cm}^2$ ) is put on the snow surface. Rod A with a small cylinder B at its bottom end (weight:  $M \text{ kg}$ ) is stood on plate C. A brass cylinder m (weight:  $m \text{ kg}$ ) with a hole through the center is held by hand  $h \text{ cm}$  above the upper surface of B with rod A passed through its central hole. When the brass cylinder m is released, it collides against cylinder B pushing the whole appliance some distance  $d \text{ cm}$  into the snow. The resisting force of the snow averaged over the distance  $d$  is equal to  $\bar{F} \text{ (kg)} = m \left(1 + \frac{h}{d}\right) + M$ . The harder the snow is, the larger the value of  $F$ . The author defines the hardness  $H$  of snow as  $F$  divided by the area  $S$  of plate C, that is,  $H = \frac{\bar{F}}{S} \text{ kg/cm}^2$ . The wide range

of hardness from about  $1 \text{ gr/cm}^2$  (new soft snow) to about  $20 \text{ kg/cm}^2$  (old compact snow) can be covered by changing the values of  $S$ ,  $m$  and  $h$ . The diameter  $D$  of plate C, the weight of  $m$  and the height  $h$  which should be most suitably chosen for different kinds of snow are shown in Table 1.

Fig. 2 shows the change in hardness of a snow cover in relation to the distance above the ground. The hardness was determined by three different hardness-meters;  $H$ —the present author's,  $K$ —Kuroda's and  $R$ —Rammsonde's. It seems that the author's gives the most reasonable hardness profile.

In Fig 3 the hardness  $H$  is plotted against the density  $\rho$  of snow. The triangles show the values obtained on wet snow, all the other marks being for dry snows of temperatures  $0^\circ \sim -9^\circ\text{C}$ . With the dry snows, the relationship between  $H$  and  $\rho$  is represented by  $H=100\rho^4$ .

The feet make a hole, ski make a spur, on the snow. The energy needed to make the hole or the spur was determined by the use of the present hardness-meter. The energy required for the hole was found to be three times as large as that for the spur. Once a hole is made, its bottom becomes five times harder than the natural snow surface.

The snow pushed down by the present hardness-meter makes a distinctly bordered region of compressed snow underneath the bottom of the hole. A thin section for microscopic observation was cut vertically through the snow below the center of a hole. The dark circular portion in Fig. 8 is the region of compressed snow. A portion of a thin section taken just below the border of the compressed region is enlarged in Fig. 9. The ice grains are joined firmly with one another. Fig. 10 is an enlarged photograph of the compressed region. The ice grains lie like sand grains with no joints between them.