



Title	衝撃による積雪の破壊 Ⅰ.
Author(s)	木下, 誠一; KINOSHITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 14, 95-115
Issue Date	1955-12-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17900">https://hdl.handle.net/2115/17900</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	14_p95-115.pdf



## 衝撃による積雪の破壊 I\*

木下 誠 一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和30年10月受理)

### I. 緒 言

積雪に衝撃圧がかかると、内部構造が破壊されて圧縮される。このような積雪の破壊現象は、積雪の力学的性質を究明する上に重要な問題であつて、摩擦、支持力、雪崩等に密接な関係がある。

吉田・黒岩<sup>1)</sup>及び筆者<sup>2)</sup>は、先に、雪の上に錘を落して雪に衝撃を与え、錘が雪の中にめり込んで行くときの雪の反抗力の時間的過程を調べて、積雪の破壊の機巧を研究した。錘は雪を破壊しながら雪の中を進むため、雪から複雑な抵抗を受け遂にある深さでとまる。この抵抗力の推移を調べることで、積雪の破壊の段階がある程度解明されたのである。

吉田・黒岩の実験<sup>1)</sup>で、一般に雪が及ぼす抵抗には、破損抵抗、速度抵抗、圧縮抵抗の三段階があることが指摘された。各段階の抵抗を簡単に述べると、次のようである。

第1段 破損抵抗 錘が雪面に達した瞬間の短い時間(高々0.01 sec)に現われる大きな抵抗である。この力のため雪の表面近くにある雪粒をつなぐ氷橋は破損をうけるが、まだ破壊には到らない。

第2段 速度抵抗 破損抵抗に続いて起るもので、錘の速度に関係する。錘の下の雪の雪粒をつなぐ氷橋を破壊するための抵抗と、錘の下に出来る破壊された雪とその周囲の破壊されない雪との間の摩擦による抵抗とにわけられる。

第3段 圧縮抵抗 破壊が進行して行く途中に強い積雪層や他の強い支持物体があるとそこで破壊がとまり、強い圧縮が起つて錘がとまる。この時に生ずる抵抗である。

吉田・黒岩について行われた筆者の先の実験<sup>2)</sup>では、更に色々な雪質について調べられ、又衝撃によつて圧縮した雪の量と衝撃エネルギーとの間の量的な関係も検討された。その結果、第2段の速度抵抗に、しまり雪では細かい変動が、湿つたざらめ雪では大きな変動が重なっていること、及び1 grの雪を圧縮するためには、ほぼ1 kg-wt-cmの衝撃エネルギーが要ることが確められた。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第304号

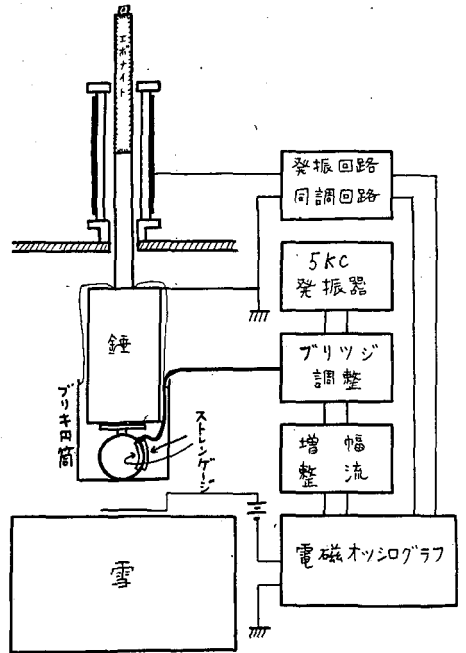
このような衝撃破壊のための抵抗がある週期をもつ断続的なものであることは、眞島の硝子<sup>7)</sup>やチヨーク<sup>8)</sup>についての破壊実験でも確められている。これは破壊が段階的に行われる結果であるが、その機巧については十分な説明がされていない。

吉田<sup>9)</sup>は積雪の場合の抵抗の変動性の原因について、ひとつの理論的解釈を与えている。それによると、これは積雪の構造に関係し、雪粒同士のつながり即ち氷橋が、random walkと同じ形で、次々と破壊されて行くことによることになる。

以上、今までに説明されたことを、簡単にまとめて述べたが、一般に破壊現象は複雑で、金属や硝子のような均質な物体の破壊でも、現在のところ、統計的に取扱うよりはかかない面が多い<sup>10)</sup>。まして積雪は内部に空隙をもつ物質で、而も一つの物理特性、例えば機械的緩和時間にしても、 $10^{-5} \sim 10^6$  sec のように広い範囲の値をとる<sup>11)</sup>ので、その破壊の機巧の研究は非常に難しい。今回は更に多くのデータをとり、圧縮された雪の断面をよく観察して、抵抗の各段階と積雪の層状構造とがどんな関係にあるかを調べることに重点を置いて実験を行った。

## II. 実験装置

従来は、雪を圧力測定器の上にのせ、それに錘を落して、雪を通じて伝えられる雪の反抗力を記録した。併し、今回は、落下する錘自身に反抗力を測る装置を取付けた。第1図に実験装置の略図を示す。錘の下には強い鋼の輪のスプリングを取付け、ブリキ円筒のカバーをする。このカバーは紐で錘にゆるく結びつけられる。このブリキ円筒のカバーの下面に雪の反抗力が加わるわけである。スプリングの外側と内側には夫々 K-11 のストレンゲージ (細い電気抵抗線を封入したセロファン紙) を張付ける。これらのゲージはホイットストーンブリツジの2辺をなし、ブリツジには約2ボルト、5 kc/s の交流電圧をかけて置く。錘を落して、雪からの反抗力がブリキ円筒にかかると、鋼のスプリングが縮み、それに応じて外側のゲージは伸び内側のゲージは縮む。この歪の差によつて、ゲージの電気抵抗が変わり、ブリツジの両端に電圧が生ずる。この電圧を増幅整流してオツシログラフに記録する。この測定方式は市販のストレンゲージ動的歪用測定器と同じである。かくして、雪の反抗力が記録されるわけであるが、この記録とスプリングが実際に受ける力との関係は次節で述べる。



第1圖 実験装置



であるが、 $F$  と  $s$  とは (6) 式で結ばれ、両者は必ずしも比例しているわけではない。以下に  $F$  と  $s$  との関係を少し吟味してみる。

まず、 $M=5000$  gr,  $m=200$  gr であるから、 $M \gg m$  で  $\mu \doteq m$  となり、(6) 式は

$$m\ddot{s} + c\dot{s} + ks = -F \quad (7)$$

と書かれる。従つて、 $s$  の固有週期は

$$T_0 = 2\pi / \sqrt{(k/m) - (c^2/4m^2)} \quad (8)$$

と書かれ、この測定器の固有振動は錘とは無関係で、スプリングとブリキ円筒カバーとの性質だけできまる。

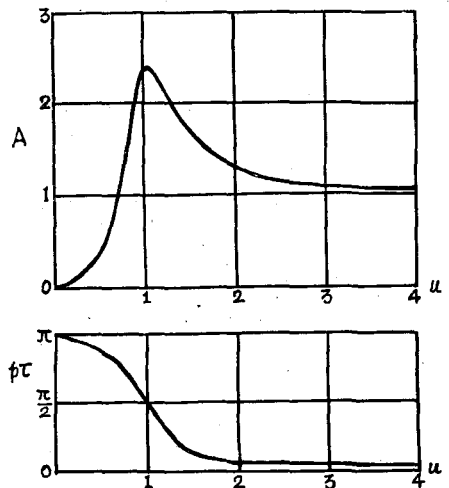
雪の反抗力  $F$  の変動は複雑であるが、今、かりにこれが週期的な力  $F=L \sin pt$  であるとする。そうすると、(7) 式から

$$s = \left\{ (L/m) / \sqrt{(k/m) - p^2 + (c^2/m^2) p^2} \right\} \sin p(t - \tau) \quad (9)$$

$$\tan p\tau = (cp/m) / \{(k/m) - p^2\} \quad (10)$$

が得られる。静的にスプリングに  $L$  の力がかかつたときの歪を  $s_0$  とすると、 $s_0=L/k$  であるから、 $s$  の振幅は  $s_0$  の  $(k/m) / \sqrt{(k/m) - p^2 + (c^2/m^2) p^2} = A$  倍になる。この倍率  $A$  と位相の遅れ  $p\tau$  とは  $p$  の函数、従つて、 $F$  の週期  $T=2\pi/p$  の函数である。 $F$  の週期  $T$  と (8) 式で与えられる固有週期  $T_0$  との比を  $u$  として、 $A$  及び  $p\tau$  が  $u$  とどんな関係にあるかは、例えば坪井忠二の“振動論”に求められている。今の実験の場合、 $T_0=(1/150)$  sec,  $(k/m) \doteq 10^4 \text{ sec}^{-2}$ ,  $(c/m) \doteq 40 \text{ sec}^{-1}$  である。第3図に、これらの値を用いた時の  $A$  及び  $p\tau$  と  $u$  との関係が示してある。これで見ると、 $u > 2$ , 即ち週期  $0.013$  sec 以上の  $F$  の変動に対しては、 $A$  の値はほぼ1で、 $p\tau$  は、0に近いから、 $s$  と  $F$  とはほぼ正確に比例するといつてよい。即ち  $0.013$  sec 以上の週期でゆつくり変動する  $F$  は正確に記録されるが、 $0.01$  sec 以下の週期の速い変動になると、この装置では余り正確には知ることが出来ないわけである。

以上は、錘が雪の中を落下しつつある途中のことであつて、このときには  $M \gg m$  の関係から、ブリキ円筒に対して錘自身は不動体の役目をし、ブリキ円筒の質量  $m$  が小さいことのため、固有週期  $T_0$  は短かかつた。しかし、落下の最後に、ブリキ円筒が雪に全く支えられて停止すると、振動するのは重い錘自身に変わり、固有週期は長くなる。即ちこのときには、



第3圖 倍率  $A$  及び位相の遅れ

$p\tau$  と  $u \left( = \frac{T}{T_0} \right)$  との関係

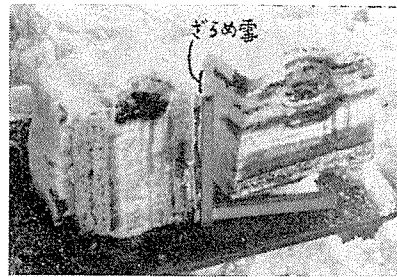
$x_1 = \text{const}$ ,  $\ddot{x}_1 = 0$  なので,

$$M\ddot{s} + c\dot{s} + ks = -Mg \quad (11)$$

が成り立つことになる。これは減衰振動を表わし、その固有週期  $T'_0$  は(8)式の  $m$  を  $M$  でおきかえたものとなり、数値を入れて計算すると、前の場合の5倍の(1/30)secとなる。この時の雪の抵抗  $F$  は  $F = Mg + mg + M\ddot{s}$  になるが、これはスプリングが雪に及ぼす力の反作用としての雪から及ぼされる力であつて、破壊によつて起る力ではない。従つて週期  $T'_0$  の振動が始まれば、錘の系は雪の中にとまつたと考えてよいわけである。例えば本文の後にのせてある Fig. II で、A点までは漸増する大きな力に細かい変動が重なつているが、A点以後は規則正しい長い週期の減衰振動になつている。A点までが雪からの抵抗を表わすもので、A点で錘がとまつたことになる。A点で錘がとまつたことは、同時に記録されている錘の位置の記録からも判定される。

#### IV. 色水撒布による積雪断面の観察

得られた雪の抵抗の時間的経過と積雪の層構造との関係を検討するために、積雪断面の色水検査を行なつた。錘を雪塊に落した後、錘であけられた穴の中心を通る面を雪塊を二つに割り、その断面に色水を霧吹きで吹きかけ、ガスの焰であぶつた。表面は融け出し、その水は表面に着いている色水と共に、雪粒の間のせまい間隙の中を伝わつて奥の方に吸い込まれ、雪が破壊、圧縮されている部分には濃い色がつく。又色々な積雪層の間で粒の状態が違えば、間隙のせまい層の方が濃い色に染まり、衝撃後の層の状態が解る。但し、ざらめ雪の層だけは、粒が大きいので、圧縮されても色水が上下に隣りしまり雪の方に取られてしまつて、色の濃淡がよく出ない。第4図に色水検査を行なつた積雪断面の写真を示す。右側は正常の位置のもの、左側は層の方向が鉛直になるようにして実験したものである。ざらめ雪の層には、圧縮されない部分にも圧縮された部分にも色がつかないで、その両隣りのしまり雪の層に吸い取られてしまつている状態がよく解る。又均一



第4図 色水検査をした積雪断面の写真

と思われるしまり雪の層でも何本も線(細いものは2mm位のものもある)が出ているが、これは粒の違いによるものである。雪粒の大きさを調べてみると、色がつく部分では粒が細かいことが解る。均一と思われるしまり雪の層でも、この様な沢山の細かい線が出ることで、即ちそこに細かい不均一があることについては、次の機会に検討を加えて見たい。

#### V. 実験結果の分類

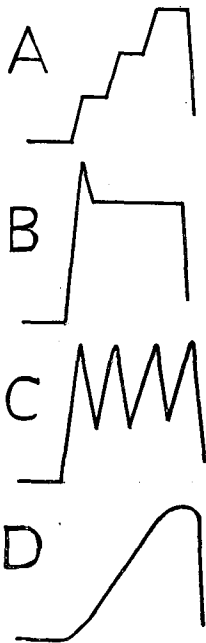
I で、錘が雪から受ける抵抗力についてこれまでに知られたことを、簡単に述べた。今回

の実験では、実験回数をふやし、同じ性質の雪について同じ条件で実験を行えば、常にほぼ同じ型のオツシログラムが得られることを、更にはつきりと確めることが出来た。そして、オツシログラムの型、従つて雪の抵抗の型が幾つかに分類されることが解つた。

オツシログラムの型は次のようにわけられる。

- A型(階段型) 抵抗力が2段乃至3段に階段的に増して行く。
- B型(一定型) 第1段の破損抵抗に続く抵抗力がほぼ一定である。
- C型(大変動型) 抵抗力が大きな振幅、週期で変動する。
- D型(漸増型) 第1段の破損抵抗がなく、徐々に抵抗力が増して行く。

第5図は、以上4つの型を模式的に表わしたものである。しかし、これらはすべて標準型であつて、実際のもは、もとよりこれと少し違つている。又ほぼ一定の抵抗に細かい変動が重なる型も多かつたので、これをBC型として表わすこととする。なお、これらの型のどの型にも入れかねる色々複雑な型のものも多少はあつた。



第5圖  
抵抗力曲線の型

本文の後に続いて、色々な型のオツシログラムとそれに対応する積雪断面の見取図とがまとめてある。本文中の図と区別して、これらの図の番号はローマ数字で、例えば Fig. I のようにして示すこととする。

オツシログラムの時間は左から右に進み、最下段の一系列に並んだ点と点との間が0.01 secである。途中から急上昇する曲線が抵抗力、左上から右下にゆるやかに下つて行く曲線が錘の位置の記録である。抵抗力の曲線が急に下り始める点からは減衰振動の形になつているが、これは、その点で錘がとまつたと考えてよいことは、既に III で述べた。錘の下面(円筒形のカバーの下面を以後単に錘の下面ということにする)が雪に接触するまでは錘は自由落下をするので、位置の曲線の左の方の部分は下に向つて凹である。しかし、抵抗力の曲線が上昇し出す点で、雪に接触すると、その後は下に向つて凸になる。接触点から右の方に点線の曲線が出ているが、これは雪から抵抗をうけずにそのまま自由落下を続けたとした場合の位置を表す曲線である。尚、先に述べた、錘が雪面に到達した瞬間の記録は、抵抗力が0から急上昇を始める瞬間と一致するので、図に書きこむことは省略した。

雪塊の断面の見取図に書き入れてある数字の意味は次の通りである。例えば Fig. I で、錘の下面と雪面との間の2.3は錘が落ちる前の雪面上の高さ(cm)、雪面の下の3.4は衝撃をうけて凹んだ雪の深さ(cm)、 $d$ は圧縮部分、即ち錘の下の圧縮された雪の厚さ(cm)、K, L, M, Nは積雪の各層の名称、0.28, 0.29, 0.30は、それを書き入れてある所の層の密度である。実験に使つた雪は、すべて1954年から1955年にかけての冬の雪で、積雪各層の名称は本書の小島の論文<sup>5)</sup>にあるのと同じである。

オツシログラムの余白に書き入れてある  $a$  は単位面積当りの凹んだ雪の量 ( $\text{gr/cm}^2$ ), 即ち錘のあけた穴の体積に初めの雪の密度をかけ, それを錘の底面積で割つたもの,  $w$  は錘の底面の単位面積当りの衝撃エネルギー ( $\text{kg-wt-cm/cm}^2$ ), 即ち錘の底面が雪面に接触したときに錘の持っていた運動エネルギーを錘の底面積で割つたものである。  $a$  は, 簡単に圧縮量と呼ぶことにする。  $a$  と  $w$  との関係については VII で述べる。

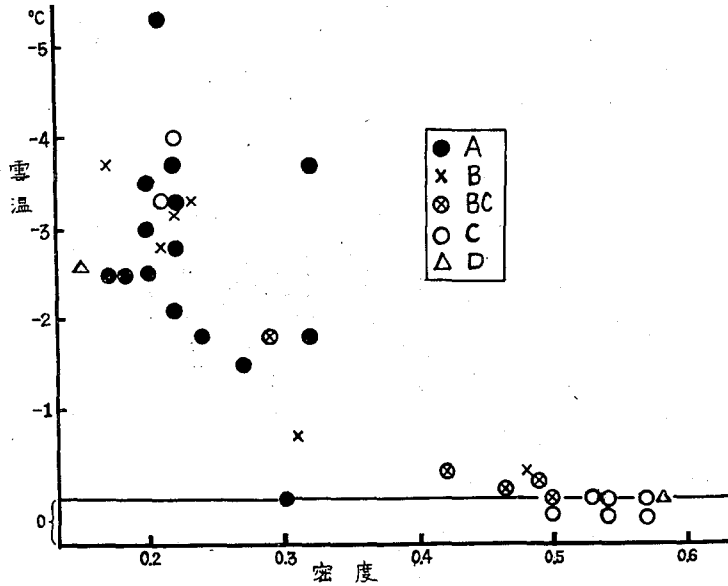
反抗力のオツシログラムを, 先に述べた A, B 等の型に分類し, それと雪質, 錘の下面の形などとの関連をみると, 大体第 1 表のようになる。引用した図は本文の後にかかっている。BC 型というのは, B 型と C 型とが結合した型という意味である。

第 1 表

型		図の番号, Fig.
A	しまり雪に多い。	I, II, III
B	ほぼ一樣な軟かいしまり雪に多い。	IV
	しまり雪の場合, 雪塊を横倒しにして, 雪の層の方向を鉛直にし, 雪の層の方向に平行に錘を落とすと, すべて B 型になる。	V, VI
C	ざらめ雪に多い。	VII
	しまり雪でも層構造が著しいと, C 型になる。	VIII
D	新雪に多い。	IX
	錘の下面を円錐形にすると, すべて D 型になる。	X
BC	粒の小さいざらめ雪に多い。	XI
	硬いしまり雪に多い。	XII

これらの型と, 雪の密度, 温度との関係を見るために, 第 6 図を作つた。すべて, 正常位置の雪塊 (積雪層が水平の位置) についてのもので, 又錘の下面の形が円筒形の場合である。測定点全体としての分布の傾向には意味はないが, 階段型の A 型は密度が小さく温度が低い雪に多く, 大変動型の C 型は温度が  $0^\circ\text{C}$  で密度の大きいざらめ雪に多いことが目立つ。又一番簡単な性質のものと想像される B 型は, 密度には大体無関係に現われるように見える。

齋藤<sup>9)</sup>は, 毎秒 1 mm 位のゆつくりした速度で, 積雪を圧縮して行く場合の, 積雪の縮み方と圧力の関係を調べている。それによると, しまり雪では圧力の変化が段階的で, ざらめ雪では連続的であるが, 加圧速度を大きくすると, 階段が著しくなり, ざらめ雪でも段階的になることを指摘している。筆者の実験では, 錘が雪の表面に接触するときの速度が数十  $\text{cm/sec}$  というほどで, 齋藤の実験に比べて加圧速度が非常に大きい。そして, ざらめ雪で, 最も大きい変動が反抗力に現われている。変動性と加圧速度との関係は, 積雪の粘弾性に関する問題であつて, いずれ検討を加えることにする。



第 6 圖 抵抗力曲線の型の分布

## VI. 実験結果の説明

以上の概括的説明につづいて、測定結果を各型に分類し、夫々について詳細な説明を加えることにする。

(1) **A 型** これは抵抗力が段階的に増して行くものである。しまり雪は A 型になることが非常に多い。本文の後に掲載してある Fig. I, Fig. II では 3 階段, Fig. III では 2 階段がみられる。階段の数は雪が硬いほど多く、階段の幅は時間にして 0.01~0.08 sec の範囲内にあるが、硬い雪ほど短いようである。抵抗力が全体として増加して行くことは、下の方に行くほど雪が強くなるためと考えられるが、階段のであることを説明は簡単にはいかない。積雪は層構造をしているので、各層の強さに差があるために抵抗力が段階的に現われるのではないかと一応は考えられるが、色水をかけて行つた層構造の色水検査の結果では、抵抗力の階段の数と同じ数の、強さの違う層があるというようなことは余り見られなかつた。又落下した錘の下の圧縮部分には数段の濃淡の縞が出来ているのが普通であるが、それと階段の数との間にも関係はないようである。しかし、層の強さと抵抗力の階段との関連が見られることもある。例えば、Fig. II の積雪断面見取図でみると、錘の下の圧縮部が強い層で喰い止められているが、このために抵抗力の第 3 階段が現われたと想像される。圧縮は F 層だけで行われ、下の E 層に及ばなかつたわけで、E 層はそれに打勝つだけの強さをもつていたわけである。

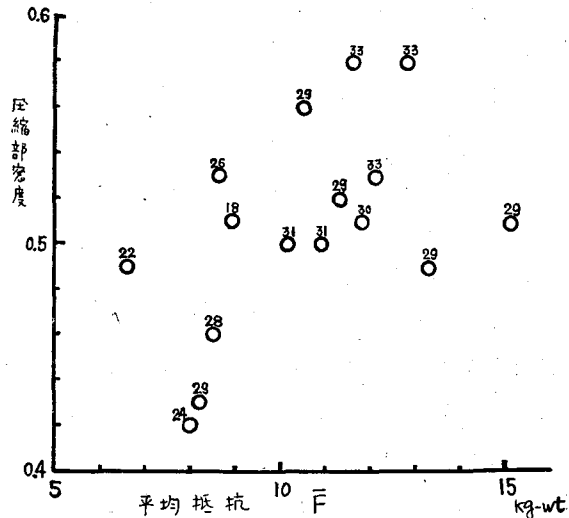
(2) **B 型** 錘の下面が雪面に接触した瞬間に大きな抵抗力が現われ、その後は、一定の値の抵抗力が続く型である。一定型ともいえる。ほぼ一樣な硬かいしまり雪に多い。Fig. IV の雪は L 層と K 層と二つの層からなつて居り、始めの大きな抵抗力は L 層の破壊に際して現わ

れたものである。破壊が K 層に及ぶと、抵抗力はほぼ一定になる。実際に L 層と K 層とは性質が非常に違っている。Fig. IV の 2 枚の写真のうち、左側は積雪断面に色水をかけたもので、これでは L 層と K 層との差は余りはずつきり解らない。右側の写真は積雪を薄い板の形に切取つて、背後から光をあてて撮つたもので、これで見ると両層の差異がよく解る。L 層の雪粒は細かく 0.2 mm 位で、K 層のは大きく 1 mm 位である。このように層構造がはずつきり違つている場合には、抵抗力にもはずつきりした違いが現われる。

左側の色水検査の写真では、圧縮部のうち、K 層から出来た部分にも三つの濃い縞がはずつきり見られる。しかし、K 層が圧縮されるときの抵抗力は一定で、殆んど変動は見られない。ところで、右側の透視写真では L 層の圧縮部と K 層の圧縮部とははずつきり区別されているが、その各々は一様である。従つて抵抗力と積雪の層構造との関連を見るためには、色水検査によるよりも透視による方が適當のように思われる。色水検査は積雪の構造を誇張して表す嫌いがあるわけである。それで結局、K 層は透視によれば一様であり、透視で一様な雪では B 型が現われると考へてもよいようである。

このことを更に確めるため、次の実験を行つた。今までのように錘の落下の方向に垂直に強さの違う層が並んでいると、落下の方向の雪質の一様性が保たれないので、積雪塊を横倒しにして、層の方向を鉛直にし、層に平行に錘を落すようにした。こうすれば、落下の方向に直角には雪は一様でないとしても、落下の方向には雪質は変わらない。従つて、各層が夫々 B 型の破壊をうけるとすれば、全体としても B 型になるであらう。そして、実際に、しまり雪では例外なく B 型が現われた。しかし、新雪、ざらめ雪では正常位置の場合と余り変りがなかつたが、これは、新雪、ざらめ層では層構造が強くないことによるのであらう。しまり雪についての例を、Fig. V と Fig. VI に示してある。Fig. V は Fig. I と同じ雪で、正常位置では A 型であるものが、この場合には B 型になつた。又圧縮部の様子も Fig. I の場合と違つて、濃淡の水平な縞はなく、鉛直方向に一様につまつている。この場合には、圧縮部が強い層で喰いとめられるようなことがないので、I で述べた圧縮抵抗に相当するものがない。抵抗力が一定の部分は速度抵抗と考へなければならぬ。

圧縮部が一様につまつているとすれば、その厚さから圧縮部の密度が計



第 7 圖 積雪層に平行に錘を落した場合の圧縮部密度と平均抵抗  $\bar{F}$  との関係

算される。大体 0.4 から 0.6 の範囲である。この圧縮部密度と平均抵抗  $\bar{F}$  (錘が雪面に達してから、雪の中にとまるまでの時間についての抵抗力の平均値) とを比較してみると、第 7 図のようになる。 $\bar{F}$  が大きいほど、密度が大きい。各点に附してある数字は圧縮を受けない前の雪の密度を、小数点以下の値だけで示したものである。例えば、28 は密度が 0.28 という意味である。

平均抵抗  $\bar{F}$  の値は次のようにして求めた。錘の質量を  $M$ 、重力の加速度を  $g$ 、錘の落下し始めから、雪の中にとまるまでの時間 (例えば Fig. V で X から Z まで) を  $T$  とすると、この間に重力は  $MgT$  だけの力積を錘に与えたわけである。ところが、錘が雪面に達してからは錘に雪からの抵抗力  $F$  が働き、錘が雪の中にとまるまでに  $P = \int_Y^Z F dt$  だけの力積を錘に与える。この  $P$  が  $MgT$  を打消したために錘がとまるのであるから、 $P = MgT$  の関係がなりたつ。従つて、錘の下面が雪の表面に接する Y 点から Z 点までの時間を  $\tau$  とすると、 $F$  の平均  $\bar{F}$  について、

$$\bar{F} = (1/\tau) \int_Y^Z F dt = MgT/\tau$$

がなりたつことになる。 $T$  と  $\tau$  とはオツシログラムから求められるから、 $\bar{F}$  もすぐ計算されるわけである。

(3) **C 型** 抵抗力の曲線が大きな波のように変動する大変動型である。ざらめ雪は大抵この型の曲線を示す。粒が大きいほど、又ぬれて含水率が高いほど、変動が激しくなる傾向がある。Fig. VII は含水率 10% 位、即ち水が飽和して流れる程度<sup>10)</sup> のざらめ雪の例である。変動の週期は 0.015~0.018 sec で、4 つの山があり、その高さは大体同じである。一般にざらめ雪では、雪塊を横倒しにして、層に平行に錘を落しても、やはり同じく C 型を示すのであつて、これは、ざらめ雪にはしまり雪のような層構造がないからであろう。実際 IV で述べたようにざらめ雪では色水検査をしても、その断面に色がつかず層構造が認められない。

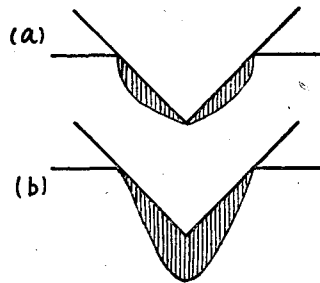
しまり雪でも層構造が著しいと、C 型になる。Fig. VIII がその例である。Fig. VIII の雪も Fig. I の雪も、ともに、野外の積雪の同じ層から切取つたものであるが、切取つて実験した時期が違う。Fig. I のは 2 月 1 日、Fig. VIII のは 1 月 21 日にとつたのであつて、Fig. I の方が 10 日間長く野外に置かれていたわけである。Fig. VIII では断面の見取図から解るように、破壊が N, M, L の三層にわたり、錘は深く雪の中に落ちこんでいる。つまり、しまり雪としても雪がまだ軟かつたわけである。このように破壊がいくつもの層にわたつている場合には、C 型になることが多いが、この場合にも、抵抗力の曲線の変動と層構造との間にはつきりした関連を見出すことは出来なかつた。Fig. I のしまり雪は 10 日間余分に締つたため、各層がかなり硬くなつている。そのため破壊は上層の N 層だけにとどまり、抵抗力の曲線も A 型にやつてしまつた。

(4) **D 型** これは、抵抗力が次第に増大して行く漸増型である。新雪は殆んど皆 D 型をあらわすのであつて、Fig. IX にその一例を示した。新雪では雪粒間をつなぐ氷の橋がまだ

出来ていないため、氷橋破壊に附随して起る抵抗の階段性が現われない。抵抗は雪粒間の摩擦によるもので、錘が雪の中を進むにつれ、その下の圧縮部が増大し、それに従つて抵抗も徐々に増して行くものと考えられる。

以上はすべて錘の下面が平面の場合であつたが、錘の下面を円錐形にすると、すべての場合、抵抗力の曲線はD型になる。Fig. Xは軟かいしまり雪についての例で、抵抗力の増して行く有様は、錘の底を平らにして新雪に落したFig. IXの場合と全く同じである。しかし、硬いしまり雪かざらめ雪になると、反抗力の曲線に見られる小さな変動がかなり著しくなり、A型の曲線に近づく。尚、Fig. Xの雪はFig. IIの雪と全く同じである。Fig. IIの場合、錘の底が平面であつたため、A型の曲線がでたが、この場合圧縮部はE層の上面で喰いとめられている。それに対して、Fig. Xの場合は錘の先端がF層を貫いてE層に入り込み、圧縮部は錘の先端を頂点として、それより上の方に円錐形に広がっている。この圧縮部の密度は0.7~0.8という大きな値である。

錘の下面が円錐形の場合に出来る圧縮部には第8図に示すような二つの型がある。軟かいしまり雪の場合は(a)のようになり、硬いしまり雪かざらめ雪の場合は(b)のようになる。ところで、(a)と(b)の場合、錘自身の落下速度が同じならば、雪の破壊が下方に進む速さは、(b)の場合の方が大きいことになる。そして、実際に、錘が雪の中に沈下した深さと、沈下に要した時間との関係を表した第15図によつて、錘の平均速度を出してみると、(a)と(b)との場合で余り違わない。それで、結局破壊の進行速度は、(a)型の圧縮部を作る軟かいしまり雪の場合よりも、(b)型の圧縮部を作る硬いしまり雪かざらめ雪の場合の方が大きいことになる。



第8圖 錘の下面が円錐形の場合に出来る圧縮部の型

(5) BC型 錘の底が平な場合に起る、B型とC型との中間の型で、硬いしまり雪か粒の小さいざらめ雪に多い。Fig. XIはざらめ雪の例、Fig. XIIは硬いしまり雪の例である。先に述べたB型やC型は、軟かい雪に多かつたが、BC型は硬い雪に多い。従つて錘の沈みも小さく、抵抗は大きな値の近くを細かく変動している。

ざらめ雪でC型のでたFig. VIIの例では、含水率が10%位であつたが、BC型のでたFig. XIの例では、含水率は、水気が認められる程度<sup>10)</sup>で、2%位であつた。従つて、含水率が高いほど、反抗力の変動は激しくなるということが出来る。

(6) その他の例 普通の状態の積雪の抵抗力曲線は、殆んどすべてが以上五つの型のいずれかに配属することが出来たが、特に著しく不連続な層構造をもつ積雪、新雪を粹につめて固めたもの、自然の積雪から切取つて来た雪を砕いて固めたもの、及び普通のままの雪に水をかけたもの等では、別の種類の抵抗力曲線が得られた。以下それについて簡単に述べる。

新雪、ざらめ雪、しまり雪と著しく性質が違ふ三層からなる雪塊についての実験では、破壊がざらめ雪の層に達した所で、特に大きな抵抗が現われた。オツシログラムでみると、抵抗曲線の途中で独立した高い山が出ている。

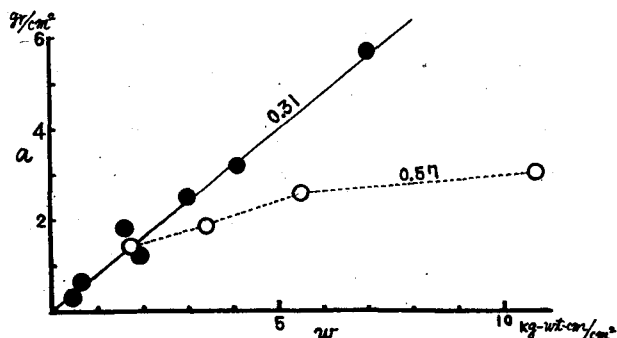
湿つた新雪を固めた場合、含水率の高いものほど、抵抗力の変動が激しくなることが確かめられた。

湿つたざらめ雪を砕いて固めた場合には、同じ含水率でも粒の大きい方が、変動が激しく現われた。自然のままの雪に水をかけると、当然含水率がますが、このときも、やはり抵抗力の変動が激しくなつた。

### VII. 圧縮量と衝撃エネルギーとの関係

質量  $M$  gr の錘が雪面上  $h$  cm から落下して、雪の中に  $D$  cm 沈んでとまつたとする。雪の初めの密度を  $\rho$  とし、錘の断面積を  $S$  cm<sup>2</sup> とすると、錘のために凹んだ雪の質量は  $\rho DS$  gr で、単位面積については  $a = \rho D$  gr/cm<sup>2</sup> である。この  $a$  を圧縮量と呼ぶ。又この時錘が雪に対して与えた衝撃エネルギーは  $Mg(h+D)$  エルグで、単位面積については、 $Mg(h+D)/S$  である。これを kg-wt-cm/cm<sup>2</sup> で表したものを  $w$  とする。本文の後に続くオツシログラムの図版には、夫々  $a$  と  $w$  の値を書きそえてある。錘の下面が円錐形の場合は、単位面積について求めないで、凹んだ雪の質量と、錘が雪に与えた衝撃エネルギー (kg-wt-cm で表したもの) との比をとり、 $a/w$  としてその値を書きそえた。 $a$  と  $w$  との関係については、筆者がすでにある程度調べたが、その結果  $a$  は  $w$  にほぼ比例し、 $w = 1$  kg-wt-cm/cm<sup>2</sup> の衝撃エネルギーについて、しまり雪では  $a = 1 \sim 2$  gr/cm<sup>2</sup>、ざらめ雪では  $a = 1.5 \sim 3$  gr/cm<sup>2</sup> になることが知られた<sup>2)</sup>。今回更に行つた実験の結果により、 $a$  と  $w$  とに関連のある事柄を更に検討してみる。

$a$  と  $w$  とが比例するためには、 $h$  と  $D$  とが比例しなければならないが、実際に、密度 0.31 のしまり雪について行つた例でみると、 $h$  を 3 cm から 50 cm まで変えたのに対し、 $D$  は 0.3 cm から 18.3 cm まで、 $h$  に比例して変つた。この時に用いた錘は径 4.8 cm, 2 kg-wt の眞鍮円壻である。この場合の  $a$  と  $w$  との関係をグラフに示したのが第 9 図の実線の直線で、黒印印の測定点はよくこの直線の上についでいる。密度の余り大きくない雪では大体、このように  $a$  と  $w$  は比例するのであるが、密度が 0.57 というような大きな値をもつたざらめ雪では、 $a$  と  $w$  のグラフは第 9 図の点線のようになり、直線には



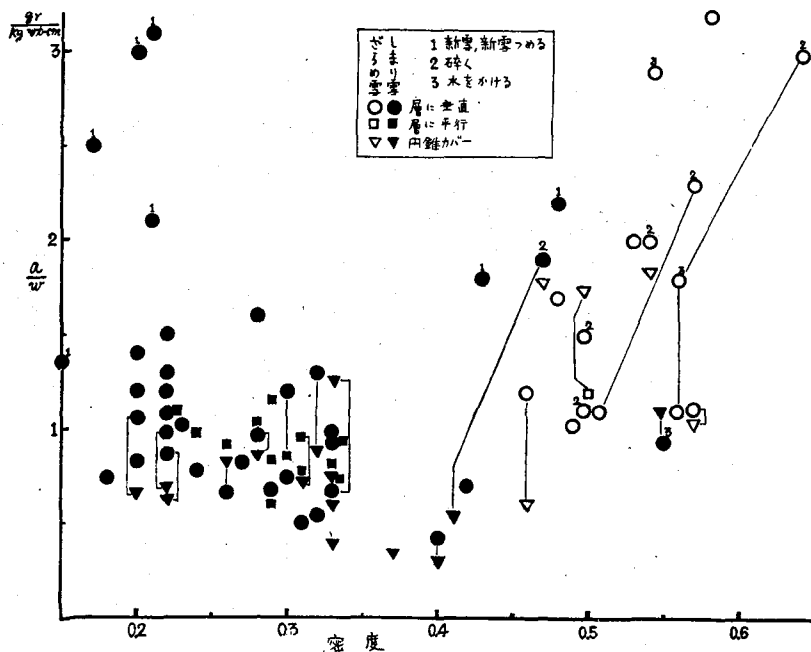
第 9 図 圧縮量  $a$  と衝撃エネルギー  $w$  との関係  
実線：しまり雪 点線：ざらめ雪

ならないのである。

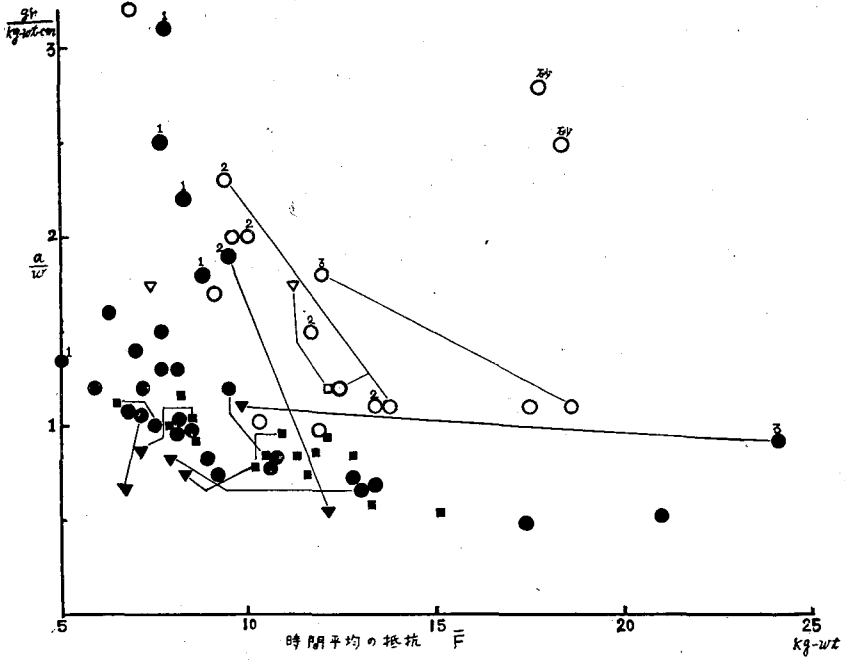
上のように雪の密度が特別に大きくないかぎり、一般に、 $a$  と  $w$  とは比例するので、 $1 \text{ kg-wt-cm}$  の衝撃エネルギーに対する雪の圧縮量  $a/w$  は、その雪の強さを示す一つの量とみることが出来る。 $a/w$  の値が大きいほど、その雪は弱く軟かいわけである。第10図に  $a/w$  と雪の密度との関係を示してある。図の中で線で結んであるのは、同じ雪塊について、錘の下面を円錐形にしたり、雪に水をかけたり、雪をいちど砕いて搗き固めたりして、条件を変えて行つた測定の結果である。しまり雪では、 $a/w$  の値は大抵0.5から1.5の間にあり、ざらめ雪では1から2の間の値のものが多かつた。新雪や、新雪を固めたものでは、1.5から3の間にある。

雪を砕いて固めたり、雪に水をかけたりすると、 $a/w$  の値は大きくなる。錘の下面を円錐形にすると、平な下面の場合に比べて小さくなり、見かけ上、雪の強さが増したような結果になる。これは、円錐形の場合の圧縮部は第8図のように、円錐面に直角の方向に発達し、圧縮部の直径が、錘が沈むにつれて大きくなるためと考えられる。錘の底が平面の場合には、圧縮部は下方に向つてのみ発達し、圧縮部の直径は増大しない。

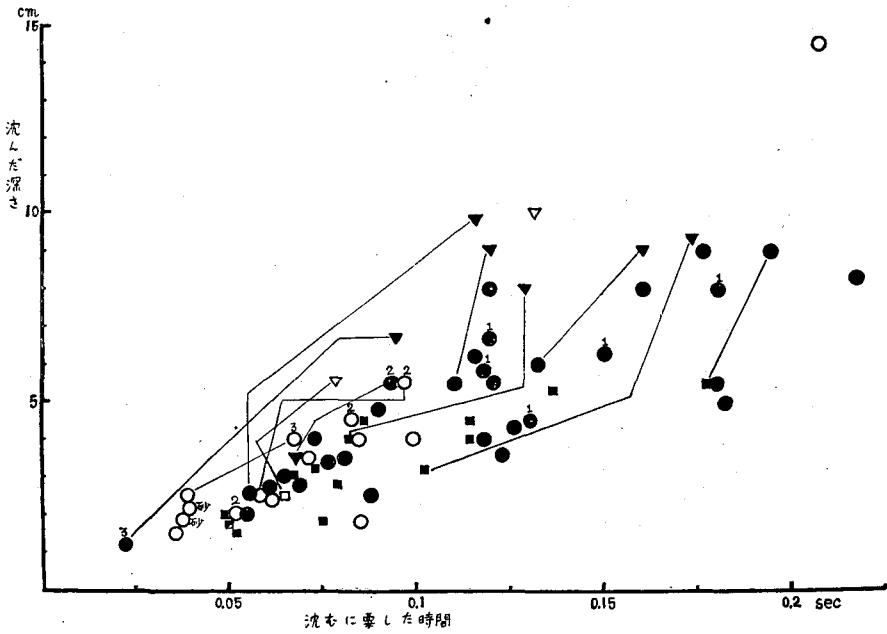
$a/w$  の値が大きいのは、雪が軟かいことを示すのであるから、その時には、当然雪からの抵抗も小さいことが考えられる。そこで、 $a/w$  と抵抗の時間平均とのグラフを第11図に書いてみた。記号の意味は第10図のと同じである。 $a/w$  の値が小さいほど、平均抵抗が大きいことが示されている。この図の上で、測定点を、大体三つのグループに別けることが出来る。上



第10図  $\frac{a}{w}$  と密度との関係、線で結んだのは同じ雪塊についてのもの



第 11 圖  $\frac{\text{壓縮量}}{\text{衝撃エネルギー}}$  と時間平均の抵抗  $\bar{F}$  との関係



第 12 圖 錘が雪の中に沈んだ深さとそれに要した時間との関係

部にあるのが、新雪、新雪をつめたもの、ざらめ雪、それを砕いて固めたもの、水をかけたものからなるグループである。中部にしまり雪のグループがあり、一番下部に、しまり雪に円錐形の下面の錘を落したときのグループがある。同じ  $a/w$  の値、つまり同じ硬さに対しては、円錐形の錘の下面としまり雪、平らな錘の下面としまり雪、同じくざらめ雪の順に抵抗が大きく、同じ抵抗力に対しては、この順に圧縮し易いことになる。錘の下面を円錐形にすると、錘の沈みは大きい、圧縮量としては小さくなる。これは、先に述べたこの場合の圧縮量の定義から、当然考えられることである。尚、実験に用いた円錐の断面の頂点の角度は  $60^\circ$ 、 $90^\circ$  の 2 種類であつた。

最後に錘の沈んだ深さとそれに要した時間との関係を第 12 図に示す。第 11 図、第 12 図に「砂」と書きそえた測定点があるが、これは、雪の代りに砂を用いた場合のものである。砂とざらめ雪とは大体近い性質のものであることが解る。

終りに、この研究に際し、御指導下さつた吉田順五教授、低温科学研究所応用物理部門の方々に感謝の意を表す。尚、この研究は文部省科学研究費によつて行われたものである。

#### 文 献

- 1) 吉田順五・黒岩大助 1950 衝撃荷重による積雪沈下の経過. 雪氷, **12**, p. 248.
- 2) 木下誠一 1953 雪の中に落下する物体に及ぼされる抵抗. 低温科学, **10**, p. 13.
- 3) 眞島正市 1936 衝撃に関する実験二三 (6). 応用物理, **5**, p. 380.
- 4) ———— 1938 チョークの衝撃試験. 応用物理, **7**, p. 262.
- 5) 吉田順五 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, **10**, p. 1.  
Zyungo Yosida and Seiiti Kinoshita 1954 Force exerted on Snow during its Break-Down. Proc. Verb. séances de l'Assemblée Générale d'Rome, UGGI.
- 6) 平田森三 1949 物理学における統計的現象 (II). 応用統計学 (克誠堂), 11. 16.  
横畑武夫 1955 金属材料の破壊および疲労に関する確率論的諸問題. 応用物理, **24**, p. 351.
- 7) Edwin Bucher 1948 Beitrag zu den Theoretischen Grundlagen des Lawinenverbaus. Beiträge z. Geolo. Schweiz, Hydro., Lief., **6**.
- 8) 小島賢治 1955 積雪層の粘性圧縮. 本誌, 物理篇, **14**, p. 77.
- 9) 斎藤鍊一 1945 積雪粒子の構造と力学的性質. 気象集誌, **23**, p. 1.
- 10) 札幌管区気象台技術部 1954 積雪基礎調査報告第一報, 昭和 28~29 年冬期調査結果.

#### Résumé

When a massive body is dropped onto the surface of snow, the body experiences an intricate series of resistance force from the snow before it is stopped after having sunk some distance into the snow. By putting a block of snow on a metal plate provided with a force recording device and dropping on the snow block a solid brass cylinder, Yosido, Kuroiwa and the present author registered, in the previous experiments, the resistance force which was transmitted through the snow to the force recording device. In the present experiment, the author attached the force recording device to the falling cylinder itself, by which means the resistance force came to be registered more accurately than before.

A hollow cylinder made of thin iron plate (diameter: 6.6 cm) with closed bottom was fitted to the lower part of a solid lead cylinder (mass: 5 kg) and between the two a ring-formed steel spring was inserted as shown in Fig. 1 of the text. Very thin wires of an alloy with high electric resistance were stretched along the surfaces of the spring. When the whole system was dropped onto the snow surface from a height 0~6 cm above its surface, the resistance force exerted by the snow on the bottom of the hollow cylinder compressed the ring-formed spring. The thin wires on its outer and inner surfaces were elongated and shortened due to the extension and contraction of each of the surfaces of the spring, respectively, with the result that their electric resistance was changed in proportion to the magnitude of the resistance force. This change in the electric resistance of the wires was recorded by an electromagnetic oscillograph.

Although not all experiments made under the same conditions yielded the same result, the mode of change in the resistance force during the time interval less than 0.2 sec needed for the falling body to be stopped in the snow after it had first touched the snow surface, can be classified into the following five types:

**A-type:** The resistance force increases step by step, forming two or three stages before it reaches the final value. Compact snow showed usually this type. (Figs. I, II, III).

**B-type:** A large resistance force lasting about 0.01 sec appears at the very first and then follows a long lasting constant resistance force. This type was found generally on uniform soft compact snow. (Fig. IV). Even non-uniform compact snow composed of several snow layers tended to belong to this type when the metal cylinder was let fall parallel to the direction of layers. (Figs. V, VI).

**C-type:** Resistance force fluctuates with large amplitude and the oscillogram of resistance force looks like a series of many steep peaks. Wet granular snow showed this type. (Fig. VII). Compact snow tended also to belong to this type when it was composed of several snow layers of strikingly different nature. (Fig. VIII).

**D-type:** Resistance force increases gradually from nothing to a maximum value showing no steps unlike those in the case of A-type. Soft fresh snow showed likely this type. (Fig. IX). When the flat bottom of the falling cylinder was replaced by a conical one with its apex downwards, resistance force belonging to this type was found also on compact snow. (Fig. X). Granular snow showed a type intermediate between A and D.

**BC-type:** A middle type between B and C. Firm compact snow and granular snow often showed this type. (Figs. XI, XII).

The energy absorbed by the snow when the metal cylinder is dropped on it is equal to  $w = \{Mg(h+D)\}/S$  kg-wt-cm/cm<sup>2</sup> per horizontal unit area, where  $Mg$ ,  $S$ ,  $h$  and  $D$  are respectively the weight of the metal cylinder, the area of its bottom, the height above the snow surface from which it is dropped and the subsidence depth at which it is stopped. This energy  $w$  is supposed to be in an intimate relation with the mass of snow which is compressed by the falling metal cylinder, that is,  $a = D\rho$  gr/cm<sup>2</sup>, where  $\rho$  is the density of snow before it is compressed. Indeed it was found that  $w$  increased in proportion to the increase in  $a$  in the case of compact snow, while the rate of increase in  $a$  was gradually diminished with the increase in  $w$  in the case of granular snow. (Fig. 9). The ratio  $w/a$  could be used as a measure representing the hardness of snow. The value of its inverse  $a/w$  was found to lie in the range from 0.5 to 1.5 in the case of compact snow.  $a/w$  is shown in Figs. 10 and 11 of the text in relation to the density of snow and to the time average value of the resistance force respectively.

When a mass of compact snow was made wet by sprinkling it with water the value of  $a/w$  became larger, showing that the snow became softer. The same result was observed when the compact snow was crushed to pieces and gathered again. Break-down of the ice bridges which had connected the ice grains composing initial snow would be the cause of increase of softness in this case. When the flat bottom of the falling cylinder was replaced by a conical one,  $a/w$  usually tended to show a smaller value, that is, the snow appeared as though it had been hardened. The cause of this decrease in  $a/w$  seems to be the fact that the snow is compressed sideways by the conical bottom unlike in the case of flat bottom where the snow is compressed only in the downward direction.

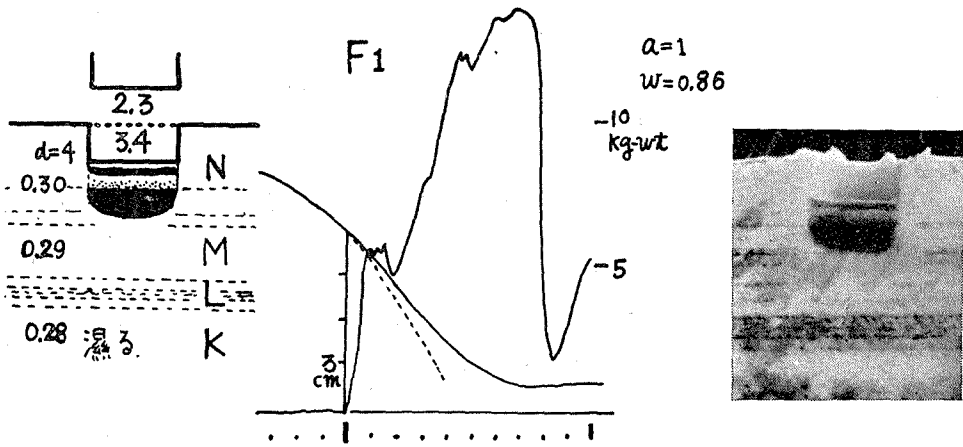


Fig. I A型 (3階段) 2月1日 しまり雪

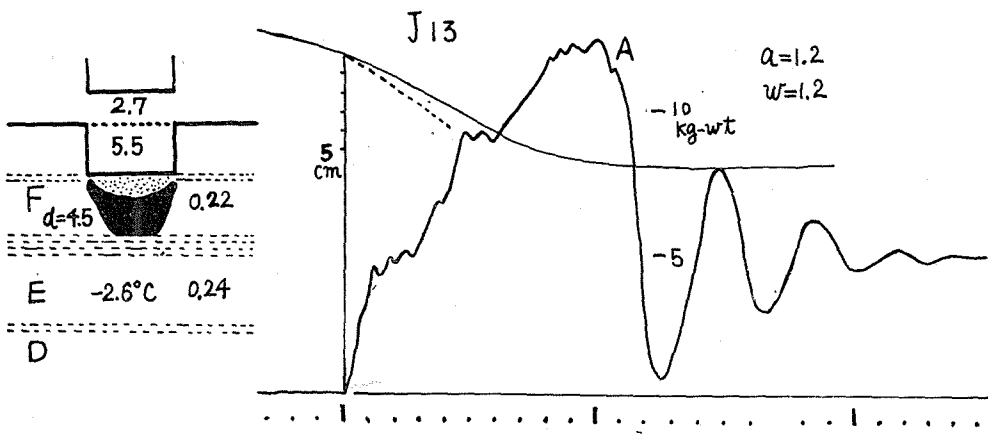


Fig. II A型 (3階段) 1月13日 しまり雪

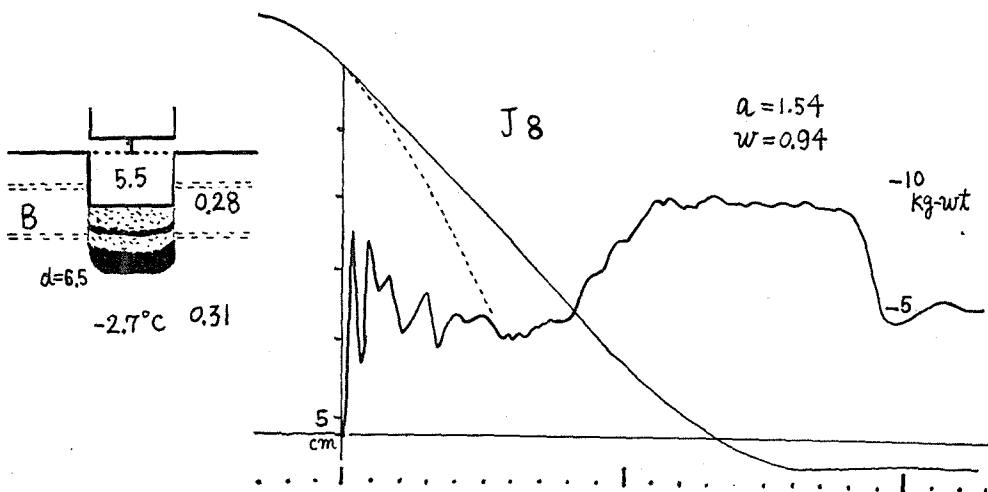


Fig. III A型 (2階段) 1月8日 しまり雪

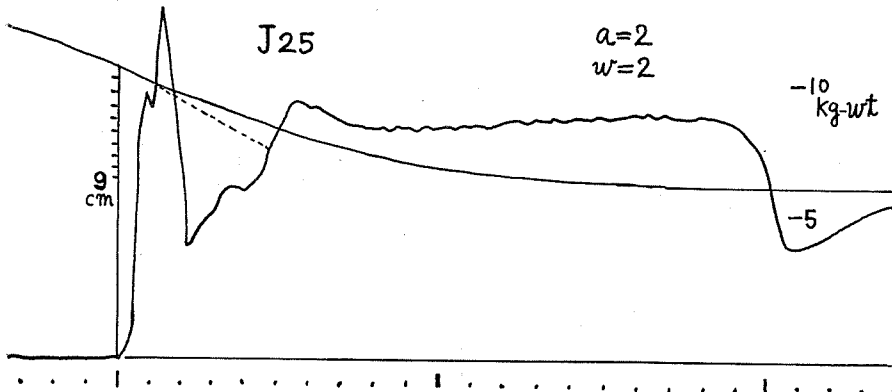
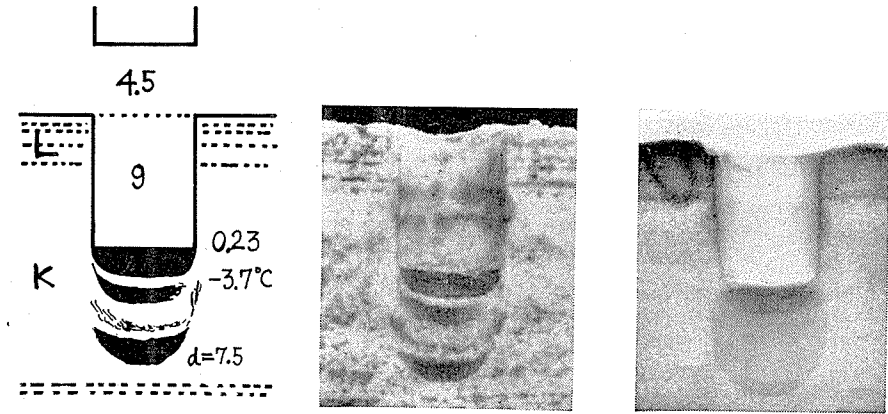


Fig. IV B型 1月25日 しまり雪

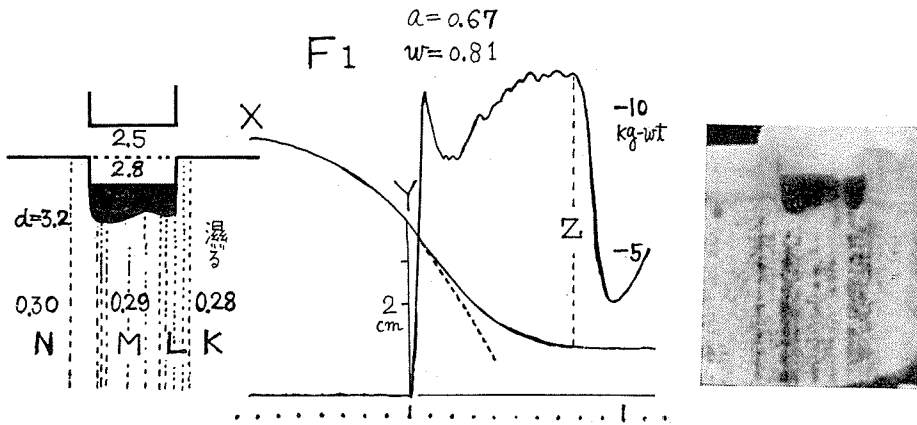


Fig. V B型 2月1日 しまり雪 層に平行に錘を落す

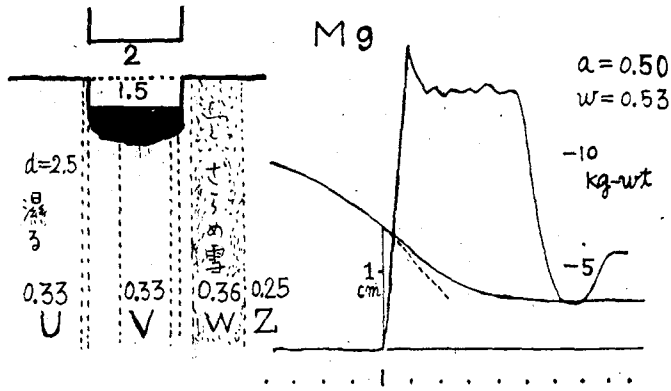


Fig. VI B型 3月9日 しまり雪 層に平行に錘を落す

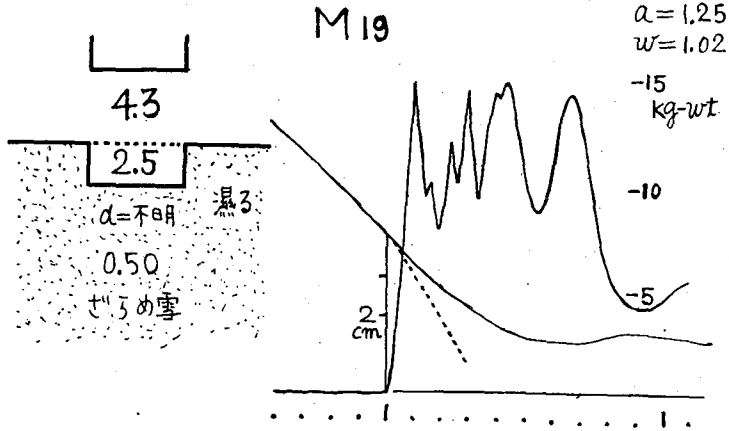


Fig. VII C型 3月19日 ざらめ雪

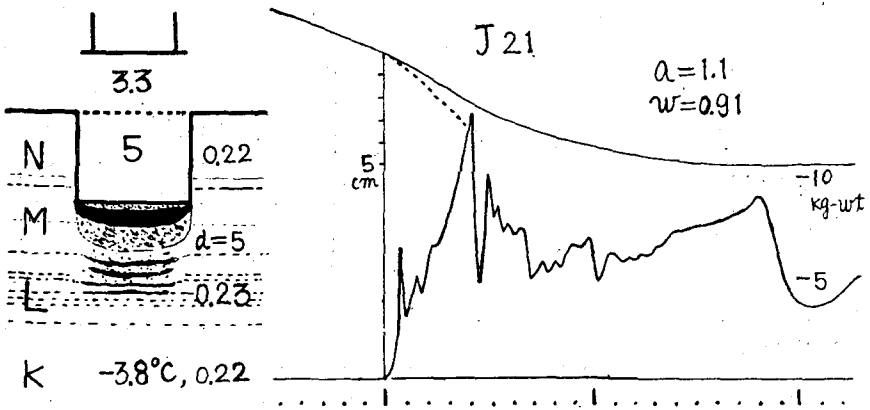


Fig. VIII C型 1月21日 しまり雪  
錘のカバーの下に径7.6 cmの円板をつける

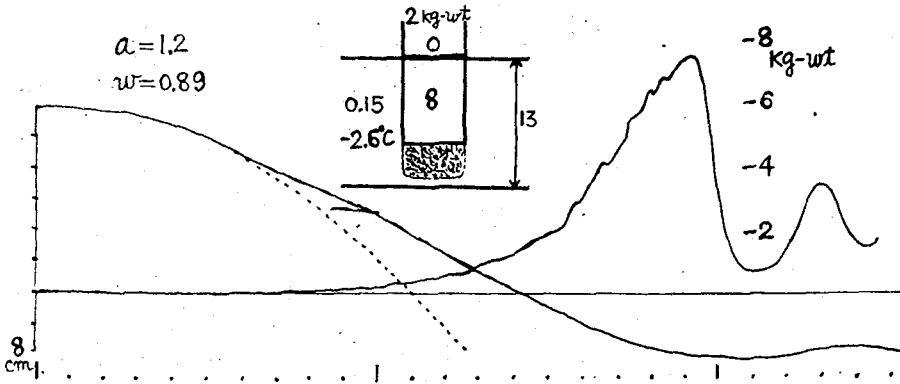


Fig. IX D型 新雪 筆者の先の実験<sup>2)</sup>で得られたもの

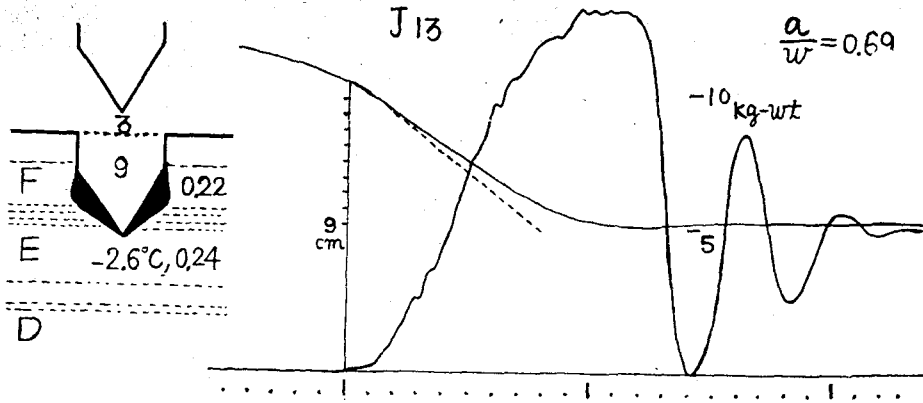


Fig. X D型 1月13日 しまり雪 錘に円錐形のカバーをつける

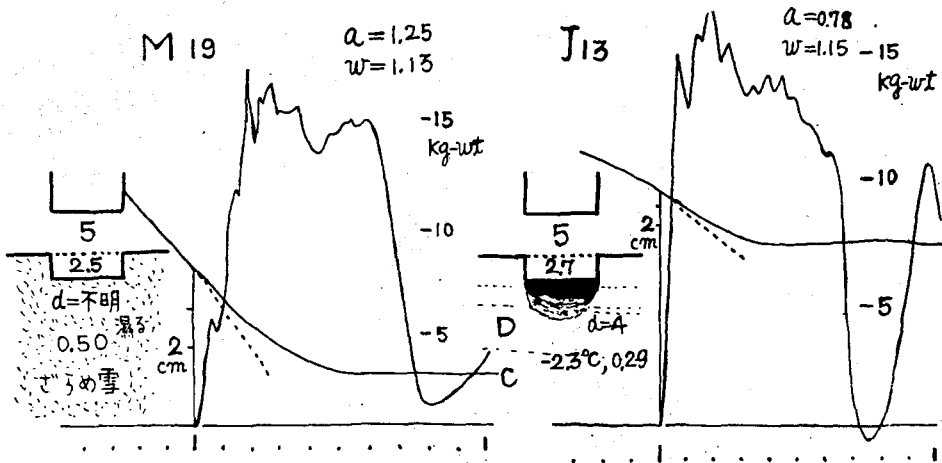


Fig. XI BC型 3月19日 粒の小さいざらめ雪

Fig. XII BC型 1月13日 硬いしまり雪