



Title	衝撃による積雪の破壊 III
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 16, 119-138
Issue Date	1957-12-13
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17932">https://hdl.handle.net/2115/17932</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	16_p119-138.pdf



## 衝撃による積雪の破壊 III\*

木下 誠 一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 32 年 7 月受理)

### 緒 言

錘を雪の上に落して雪に衝撃を与えると、錘は雪の中に或る深さめりこんで停る。雪には短時間に大きな力が働き、雪は衝撃的な力のもとに大きな変形を起し破壊する。このような積雪の衝撃破壊の現象は、積雪の力学的性質を究明する上に重要な問題であつて、雪崩、摩擦、支持力等に密接な関係がある。

筆者は、落体が積雪を衝撃破壊する際に、雪からうける反抗力の推移を電磁オツシログラフに記録して、積雪の破壊現象を研究した。この研究は過去数年にわたつて、続けられて来たが<sup>1)3)</sup>、これまでに得られた結果を簡単にまとめると、次のようである。

(1) 反抗力曲線には、一般に細かい変動が見られるが、それをならした大体の型について分類すると、雪質によつて階段型、一定型、大変動型、漸増型等に分類される。

(2) 層状構造が著しい雪の場合、破壊された各層の強さ(支持力)と反抗力曲線に現われる大きな変動とが対応する。

(3) 一様と思われる層が破壊される場合でも間歇的な反抗力が激しく現われることがある。

(4) 落体によつて衝撃破壊をうけて出来た雪の穴の底は非常に丈夫になる。

(5) 圧縮量  $a$  gr (落体が雪の中にめりこんだ体積と始めの雪の密度との積)と、衝撃エネルギー  $w$  kg·cm (落下に費した落体の位置エネルギーの変化量)との比  $a/w$  は、雪の軟かさを示す量で、しまり雪やざらめ雪では、 $a/w = 0.5 \sim 2$  gr/kg·cm、新雪や霜ざらめ雪では、 $a/w = 3 \sim 10$  gr/kg·cm である。

又これらの研究をまとめて、共同研究としての「積雪の物理学的研究」の一部として、吉田、筆者及びその他の共同研究者連名の下に英文報告<sup>4)</sup>を出した。しかし、積雪の落体による衝撃破壊の現象は非常に複雑で、上記の既に発表された論文の内容を取りまとめると共に、それに尚幾多の補足を加えたものを、この論文で述べる。

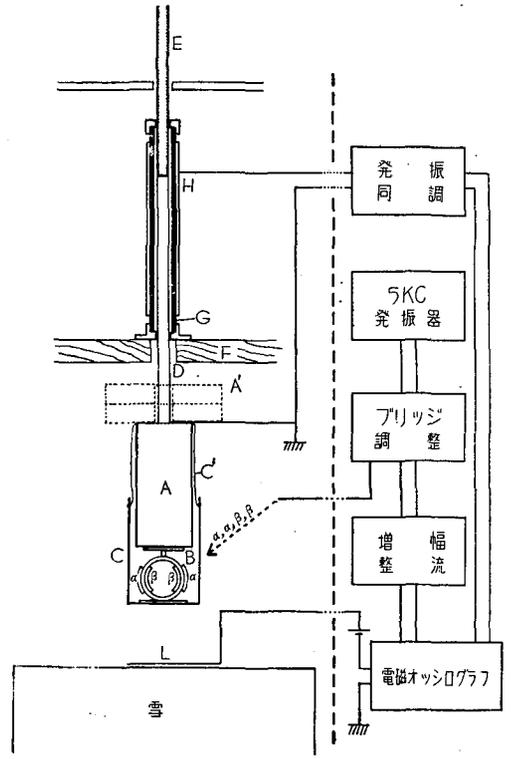
### I. 実験方法

円筒形の錘を雪の上数 cm の高さから落して、錘の下面が雪面に接触した瞬間、錘が雪か

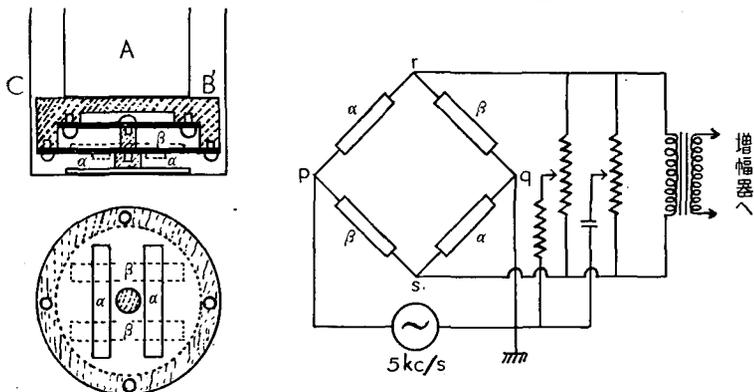
\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 375 号

らうける反抗力，落下する錘の刻々の位置を電磁オシログラフに記録した。錘の目方は2～10 kgで，錘の下面の形としては，径2.7～12 cmの円板及び頂角90°の円錐を用いた。実験装置の略図を第1図及び第2図に示す。

**積雪の反抗力の測定法** 第1図で，落下する錘がA（更に錘A'を加えることもある）である。その下部に薄いブリキ製の円筒カバーCを被せ，錘とカバーとの間に，力の測定器B又は第2図のB'をつける。カバーCは紐C'で錘Aにゆるく結びつけられる。Bは強い鋼の輪で，輪の内側と外側に2枚ずつ4枚のストレンゲージ（KB-2） $\alpha, \alpha, \beta, \beta$ をはりつけ，それを第2図の左側に示したようなブリッジに組む。もう一つの測定器である第2図左のB'は周縁が抑えられている二重の連動円板（厚さ1 mmの磷青銅板。中央部の可動範囲の直径は，夫々3.4 cm, 5.4 cm）で出来ていて，大きい方の円板の表と裏とに2枚ずつ4枚のストレンゲージ（KB-2） $\alpha, \alpha, \beta, \beta$ をはりつけ，Bと同じようにブリッジに組む。ブリッジの端pqに，5 kc/s, 1～6 ボルトの交流電圧をかける。雪からの反抗力がブリキカバーCにかかると，Bの輪は縮み，B'の二重円板の中心は上方に凹む。それに応じて，B, B' いずれの場合も，ゲージ $\alpha, \alpha$ の細い電気抵抗線は伸び， $\beta, \beta$ の抵抗線は縮む。この抵抗線の伸縮のためゲージの電気抵抗が変わり，ブリッジの両端rsに電圧が生ずる。この電圧



第1図 実験装置



第2図 力の測定器B'とストレンゲージ $\alpha, \alpha, \beta, \beta$ のブリッジ結合

を増幅、整流して電磁オツシログラフ (H型振動子) に記録すれば、落下する錘が雪からうける反抗力の時間的变化が得られるわけである。測定器 B の方が B' より感度はよいが固有週期は長い。B, B' の固有週期は夫々ほぼ 1/300 秒, 1/500 秒で、夫々ほぼ 1/150 秒, 1/300 秒内に起る抵抗力の変動迄は正確に測定することが出来る。

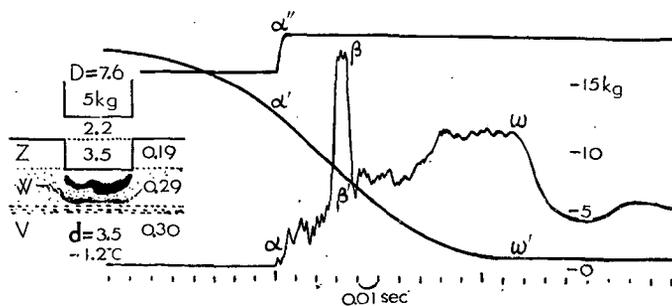
**落下する錘の位置の記録** 第1図のように錘 A の上端に細長い棒 DE を取りつける。この棒は錘の落下と共に、丈夫な枠 F に取付けられたプラスチックの筒 G の中をすべり落ちる。棒は上半分 E がエポナイト、下半分 D が真鍮で、筒 G の外側には、金属の箔 H がまきつけてある。この金属箔 H と棒の真鍮部分 D とで蓄電器を形成させてあるので、棒が筒の中を下るにつれて、その電気容量が減つて行く。従つて、この電気容量の変化を電流に変えてオツシログラフに記録すれば、錘の位置の変化が解る。

**錘の下面が雪面に到達する瞬間の記録** 第1図のように雪面に細い針金 L をねかせ、ブリキカバー C が雪面に到達する瞬間に、一つの電気回路が閉じるようにしておく。それによつて生ずる電流をオツシログラムに記録することにより、錘の下面が雪面に接触した瞬間が解る。

第3図にオツシログラムの一例を示す。時間は左から右に進む。 $\alpha\beta\omega$  が反抗力、 $\alpha'\beta'\omega'$  が錘の位置を示す曲線である。図の上方で水平な直線が点  $\alpha''$  で急に上昇しているが、ここが錘と雪との接触の瞬間である。

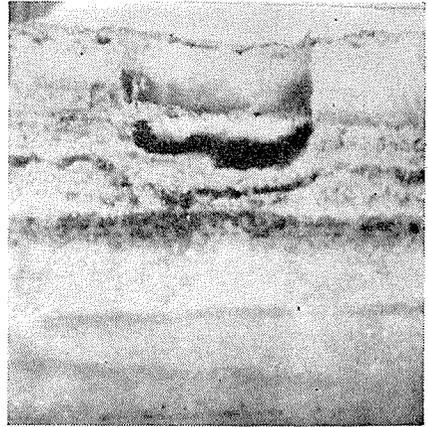
第1図の実験装置の略図の中央の破線より右の部分 (電気回路) は実験室内に置き、左の部分 (錘を雪に落す装置) は実験室の外側の窓のすぐ傍の野外に置いた。試料の雪塊は縦横高さ共に 20~25 cm で、その雪面上数 cm から錘を落した。錘は 1/10 か 2/10 秒で落下を停止するが、この停止は反抗力曲線が急に下降を始める点  $\omega$ 、或は位置の線が水平になり始める点  $\omega'$  で示される。停止した後も、反抗力曲線は周期の長い減衰振動を示しているが、これは、雪に支えられて停止したカバー C に対する錘 A の振動を示すものにすぎない。

**衝撃をうけて凹んだ雪の断面の色水検査** 落体によつて雪の中に出来た凹みの中心を通る鉛直断面を作り、それにインキをまぜた色水を霧吹で吹きかけ、更にそのあとをガスの焰であぶる。すると、破壊されて雪粒がつかまつている圧縮部には、色水がしみこんで濃い色がつく。これによつて破壊が雪の中のどこまで及んでいるかが解る。又、凹みの周りの破壊されなかつ



第3図 雪の断面とオツシログラムの一例, 1955年3月4日の実験

た部分の雪の層状構造もよく解る。第4図の写真は、このような色水検査を行なった断面の写真で、第3図のオツシログラムの左側にあるのは、その見取図である。見取図に書き入れてある数字及び記号の意味は次の通りである。D=7.6は錘の下面の直径が7.6 cmであることを、又錘の下面と雪面との間にある2.2は、雪面上2.2 cmの高さから錘を落したことを示す。雪面の凹んだ部分に書いてある3.5は、凹みの深さが3.5 cmであることを、又d=3.5は圧縮部分即ち錘の下の圧縮された雪の厚さが3.5 cmであることを示す。左側のV, W, Zは用いた積雪を形成している積雪層の名称<sup>5)~7)</sup>で、右側の0.19, 0.29, 0.30はそれを書き入れてある所の層の密度 ( $\text{gr/cm}^3$ ) である。



第4図 色水検査をした雪の断面の写真  
第3図の実験の雪

## II. 反抗力曲線の型

反抗力曲線は、雪の種類、構造により色々に変り、且つ第3図に示したように常に細かい変動が見られる。しかし、この細かい変動をならした曲線を考えてみると、それは大体次の五つの型に分類される。筆者の前に書いた論文<sup>2)</sup>では、このA, B, C, D, AB型を夫々B, C, A, D, BC型としてある。

**A型** (一定型) 始めに大きな力が短い時間(0.01秒以内)働くが、以後はほぼ一定である。

**B型** (大変動型) 大きな山が数個連つて現われる。

**C型** (階段型) 2段乃至3段に階段的に上昇して行く。

**D型** (漸増型) 0から次第に滑らかに上昇して行く。

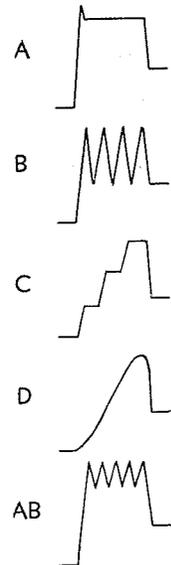
**AB型** A型とB型の中間の型

第5図に上の五つの型の模式図を示してある。しかし、実際の反抗力曲線のうちには、以上五つの型に判然と区別されないものもあつて、以上の分類は、その意味で、ある程度便宜的なものであることを免れない。しかし、余り密接な関係ではないとはいえ、雪の密度、硬度などとこれらの型との間には或る程度の関連がみられるので、次にそれについて説明する。

**A型** 密度0.17~0.26, 平均反抗力0.04~0.25  $\text{kg/cm}^2$  の一様な軟かいしまり雪に多い。又積雪層が鉛直になるように、試料の雪塊を横倒しにして積雪層に平行に錘を落すと、例外なくA型になる。

**B型** 密度0.4以上の湿つたざらめ雪に多いが、しまり雪でも層状構造が著しいときにはこの型になる。

**C型** 密度0.17~0.36, 平均反抗力0.02~0.4  $\text{kg/cm}^2$  の普通のしまり



第5図 反抗力曲線の型

雪は殆んど C 型である。

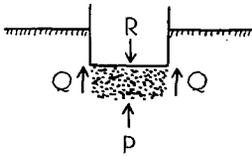
**D 型** 密度 0.2 以下, 平均反抗力  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  以下の新雪に多い。又錘の下面を円錐形にすると, どんな雪質でも D 型になる。

**AB 型** 密度 0.26 以上, 平均反抗力  $0.3 \text{ kg/cm}^2$  以上の硬いしまり雪やざらめ雪に多い。

### III. 反抗力曲線の型の由来

錘はその下にある雪を破壊圧縮し, この圧縮された雪の存在する範囲 (以後圧縮部という) は錘の落下と共に成長する。錘が雪からうける反抗力  $R$  は, この圧縮部にその周りの破壊されない雪が及ぼす力に他ならない。従つて,  $R$  は第 6 図に示したように, 圧縮部下面に働く圧力抵抗  $P$  と, 圧縮部側面に働く抗剪抵抗  $Q$  との和となる。次の方法によると,  $Q$  を消去して  $P$  だけを測定することが出来る。

雪を円筒形の柱に切り取り, その円筒面を丈夫な軟かい紙で包んで糊づけする。この雪の円柱に上から錘を落とすと, 雪の柱は側方にはみ出すことなく, 鉛直方向に縮むだけである。しかも, 紙は軟かいから, この縮みに対しては何の影響も与えない。このようにすると, 圧縮部の周りには雪がないから,  $Q$  は 0 となり, 圧縮部の下面に働く圧力抵抗  $P$  だけが測定される。



第 6 図 落下する錘に働く力  $R$  が  $P$  と  $Q$  にわけられる

尚, 筆者は次のような測定を試みた。第 7 図 (c) の左側に示したような断面  $10 \times 5 \text{ cm}$  の矩形の細長い木の箱を作り, その中央の幅  $10 \text{ cm}$  の部分 (第 7 図 (c) の A 部分) を取外せるようにしておく。箱に丁度はまる形に積雪を切取つて, この取外し部分をつけたままの箱の中に差入れ, これを台 B の上に横たえる。

錘を A 部分の上に落とすと, 雪は A 部分の左右の端の所で断ち切れ, 下に落ちる。この場合, 落下する錘が箱の上面に接触した瞬間, 雪はそれ自身の強さのため, すぐには A 部分の両端で切断されないので, A 部分の雪の最上層の薄い層は圧縮される筈である。従つて, 錘が箱の上面に接触した瞬間から暫くの間は, そこに圧縮部が生れ, その底面にも側面にも力が働き, 錘に対する反抗力曲線は  $R$  曲線となる。しかし, その後では A 部分の雪は, その両端で切断されて落ちるので, 圧縮部の成長が止むと同時に錘に対する雪の反抗力は消失してしまう。かくして, この方法によると  $R$  曲線の初期の部分だけを切離して観測出来ることになる。この場合の反抗力曲線を  $S$  曲線ということにする。

第 7 図の (a), (b), (c) は, 夫々密度 0.28 の同一の雪についてとつた  $P$ ,  $R$ ,  $S$  曲線である。圧縮部の側面に働く抗剪抵抗  $Q$  を取去つた  $P$  曲線では, 反抗力は最初の小さな値から出発して, 途中までは直線的に上昇し, その後はほぼ一定の値を保ちつつ錘の停止の時まで続く。ところが, (b) 図の  $R$  曲線は最初から大きな値まで昇り, その後は終りまで, ほぼその値を持ち続けている。つまり,  $R$  曲線は大体四角の形をもっており, その左上の隅を斜めにそぎとつた形のものが  $P$  曲線となつているわけである。一方,  $R$  曲線の最初の部分だけを表わしている筈の  $S$

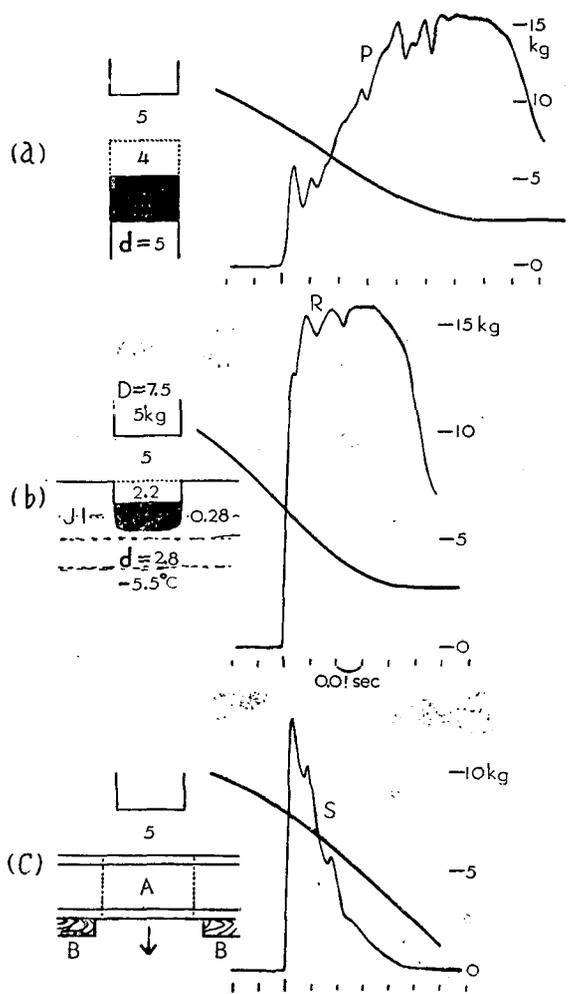
曲線は、(c) 図に示されている通り、最初急激に上昇して大きな値に達し、その後は比較的緩かに減少している。そして、この S 曲線を P 曲線に加え合わせると、その形は R 曲線の形に近いものとなる。

以上のことから次のような結論が得られるであろう。雪の反抗力  $R$  は  $P$  と  $Q$  との和であるが、錘が雪に接触してから暫くの間、まだ錘の落下速度の大きい時期には、 $P$  は比較的小さく  $Q$  が大きい。しかし、錘の落下の終末に近づいて錘の落下速度が減少すると、 $Q$  は小さくなって、 $R$  は殆んど  $P$  だけで成立っているようになる。どういう機構によつてこのようなことになるのか直ちには説明がつかないが、色々な雪についてとつた R 曲線のうちには、最初に急峻な高いピークを示すものがかなり沢山見受けられる。この種のピークは、錘が雪に接触した瞬間に現われる大きな値の抗剪抵抗  $Q$  によるものと思われる。

次に反抗力曲線の色々な型が現われる機構について考えてみよう。

**A 型** (第 8 図 (b), 第 9 図) これは最初大きな力が短い時間働き、その後

ほぼ一定の力が続く型である。層状構造の著しい雪でも、それからとつた雪塊を横倒しにして、積雪層を鉛直にして錘を落せば、錘の落下の方向には雪の性質は一樣となる。こういう場合、反抗力曲線が例外なく A 型になることを前に述べた。最初の大きな力は、前述の抗剪抵抗  $Q$  に起因するものである。反抗力  $R$  が一定になるのは、同じ強さの雪が次々に破壊されて行くことになるからである。第 8 図 (a), (b) は同一の雪塊についての反抗力曲線であるが、(a) は雪塊を自然の位置においた場合のもの、(b) は雪塊を横倒しにおいて層が鉛直になるようにした場合のものである。(a) の曲線は C 型であるが、(b) は A 型である。結局、錘の落下方向に雪が一樣であれば、A 型の反抗力が現われるのであつて、雪塊を横倒しにおかず、自然のままの



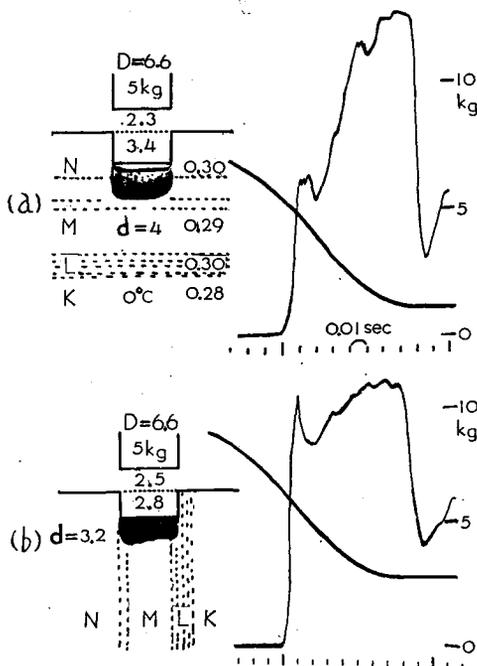
第 7 図 1957 年 1 月 18 日の実験、しまり雪

- (a) P 曲線；紙でつつんだ雪の円柱に錘を落す
- (b) R 曲線
- (c) S 曲線；A 部分を切落す

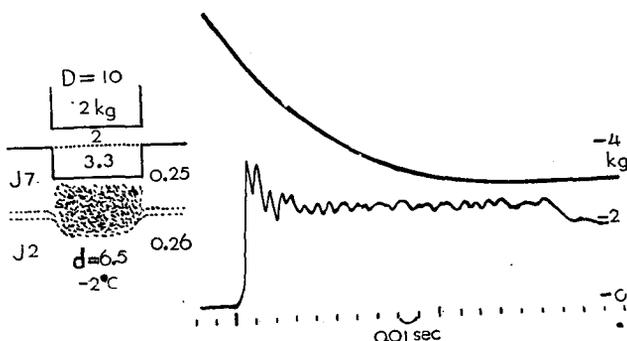
位置においても、もし雪塊全体が一様ならば A 型曲線が得られる。第 9 図はほぼ一様な軟かい霜ざらめ雪の塊に、自然のままの位置で、即ち雪層に垂直に、錘を落したときの反抗力曲線で典型的な A 型曲線を示している。

**B 型** (第 10 図) どの型の反抗力曲線にも細かい変動が重なっているが、第 10 図のように湿つたざらめ雪では、反抗力の変動が特に大きい。このような型を B 型とする。湿つた雪が流動性に富むことは、藤岡の実験<sup>9)</sup>によつて確かめられているが、このことは、積雪をレオロジー的に Maxwell 模型で表わすとすれば、その緩和時間  $\tau$  が短いことに相当する。緩和時間が短いと、落下する錘によつて雪が圧縮されても生じたストレスは速かに緩和され、ストレスが破壊ストレスの値に達する迄に、長い時間がかかる。破壊ストレスに達して雪が破壊すれば、ストレスは殆んど消失する。そして再び落下する錘によつて雪は圧縮をうけ、ストレスが緩漫に増大して行くことになる。雪の反抗力は、元来、雪の中に生じたストレスによつて起るものであるから、ストレスが上のような変化をすれば、反抗力はかなり長い間をおいたピークを示すことになる筈である。湿つたざらめ雪について得られた第 10 図の反抗力曲線は、この原因によつて生じたものと考えられる。

この反抗力曲線のピークの間隔は、緩和時間を 0.5 秒にとるとよく説明される。(文献 4) の p. 18)。積雪の緩和時間については、筆者の別の論文<sup>1)</sup>で詳しく取扱うが、小島の実験<sup>10)</sup>によると、乾いたしまり雪では数分の程度である。従つて、湿つたざらめ雪の緩和時間が 1 秒以内で



第 8 図 (a) C 型 (階段型); 3 階段 1955 年 2 月 1 日の実験, しまり雪  
(b) A 型 (一定型); 同じ雪を横倒しにする



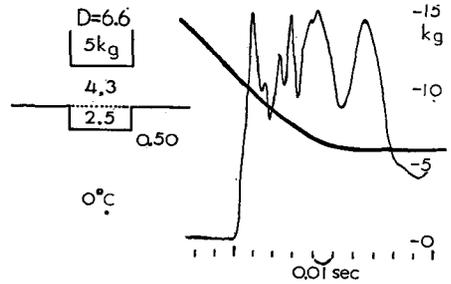
第 9 図 A 型 (一定型); 1956 年 1 月 30 日の実験, 霜ざらめ雪

あることは十分に予想される所である。

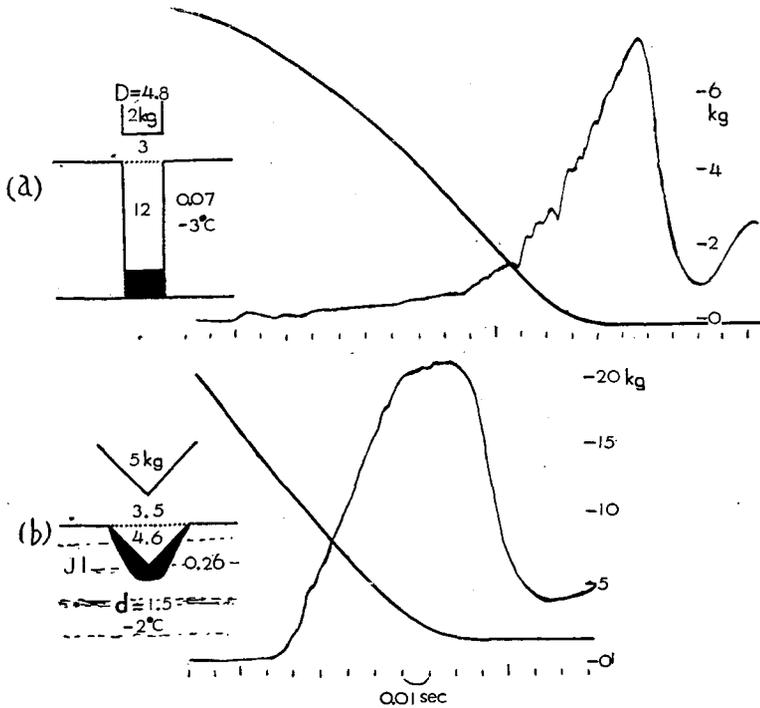
乾いたしまり雪でも、反抗力の変動が大きいB型曲線を示すものがあるが、これは積雪の層状構造の複雑さによるものである。このことについて後にV.で取扱う。先に出した第3図はZ(新雪), W(ざらめ雪), V(しまり雪)と非常に性質の異なる三つの雪層からなる、雪塊についての反抗力曲線でB型に属する。

**C型** (第8図(a)) 一般にしまり雪は、色水検査による層状模様から解るように、幅数mmから数cmのいくつかの層が形成されていて、その層は下のもの程丈夫なのが普通である。従つて、錘が積雪層に垂直に落下して、破壊が下方に進むにつれ、反抗力は段階的に増加することになる。第8図(a)はこの三つの階段が見られるC型曲線の例である。色水検査によると、圧縮部の上の部分は淡いが、下の部分は濃い。後半の強い反抗力のため強い圧縮が起つて、圧縮部の下の部分がきつくつまつたためであらう。

**D型** (第11図(a), (b)) 軟かい新雪の場合には、錘が雪面に接触しても、すぐには大きな反抗力が現われず、反抗力は0から始まつて次第に増して、D型曲線を与える。新雪ではまだ



第10図 B型(大変動型); 1955年3月19日の実験, ざらめ雪



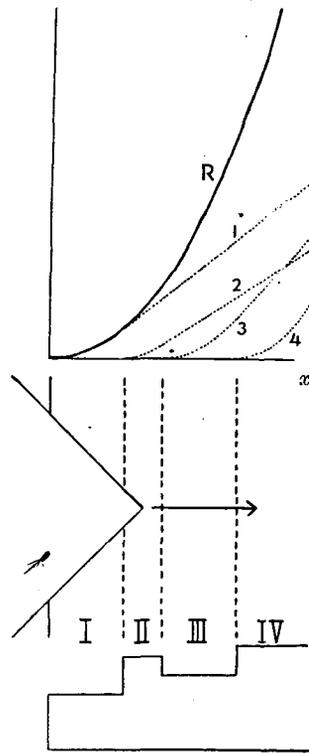
第11図 D型(漸増型); (a) 1950年12月8日の実験, 新雪  
(b) 錘の下面を円錐カパーにする。1957年1月16日の実験, しまり雪

雪粒同士をつなぐ氷橋が発達していないため、圧力抵抗  $P$  も抗剪抵抗  $Q$  も共に非常に小さく、錘の重量を支えるだけの力がないので、錘の下に成長する圧縮部が雪塊の底に達して、雪塊をのせている台で支えられる迄、錘の落下は止まらない。第 11 図 a) は新雪について得られた D 型曲線の例であるが、最初から中程迄は、抵抗力が直線的に緩かに増大している。この増大は圧縮部が成長するにつれ、その側面の面積が大きくなつて抗剪抵抗力が増大するためであると考えられる。直線的増大部が終つた所は、圧縮部の下端が雪塊の底に達した時である。それ以後は圧縮部が更に圧縮をうけることになり、抵抗力は急激に増大するようになる。

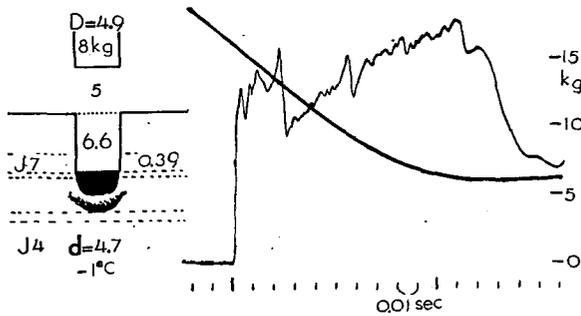
錘の下面を平らな円板でなく、頂点を下に向けた円錐形にすると、どんな雪でも D 型曲線を与えることを前に述べた。第 11 図 (b) は層状構造のある積雪塊を自然のままの位置におき、層に垂直な方向に、頂角  $90^\circ$  の円錐形底面の錘の落したときの抵抗力曲線である。底面が円板の錘のときには、AB 型の抵抗力曲線を示した雪が、図に見られる通り、この場合には D 型曲線を見わした。

円錐形物体が雪の中に落される場合は、破壊圧縮された雪の層が円錐面に沿つて発達し、雪面から円錐の頂点迄の距離を  $x$  とすると、その圧縮層とそれを取巻く破壊されない雪との境界面の面積は  $x^2$  に比例する。そして、雪の抵抗力は、この境界面を通して破壊されない雪が圧縮層に及ぼす力の鉛直成分であるから、抵抗力は  $x^2$  に比例することになる。一方、一様な雪は、平らな底面をもつた錘に対しては、持続するほぼ一定値の抵抗力を現わし、それを A 型抵抗力と名づけた。平らな底面の場合には圧縮された雪の底面の面積は変化せず、而も、抵抗力の大部分は、この底面を通してその下にある破壊されていない雪から及ぼされる圧力抵抗であつた。従つて、圧縮部と破壊されていない雪との境界面が  $x^2$  に比例する円錐底面の場合には、もし雪が一様ならば、抵抗力はほぼ  $x^2$  に比例して増大する筈である。しかし、一様なある厚さを持つていて、円錐がその厚さをつきぬけてしまえば、それから後は圧縮層と破壊されない雪との境界面は  $x$  に比例して増大するようになるので、抵抗力曲線も  $x$  に比例して増大するようになる。

円錐底面の錘が落下した雪が、第 12 図の中段に示したように、I, II, III, IV と性質の異なる雪層からなるとしよう。左が上、右が下で、円錐は雪層に垂直に左から右に向つて雪層を貫いて行くものとする。そして、各層の強度は夫々に違い、もし平らな底の錘を落したとしたら、第 12 図の下段に示したような層の境界ごとに不連続をもつ抵抗力曲線が得ら



第 12 図 円錐形の錘が強さの違う四つの雪層 (I, II, III, IV) を次々に破壊して行く時に生ずる抵抗力曲線 R.



第13図 AB型, 1957年2月5日の実験, 硬いしまり雪

れるものとする。錘の底が円錐の場合には、各層は上に説明した理由により、第12図の上段に夫々点線1, 2, 3, 4で表わしたような抵抗力曲線を持つであろう。そしてこれらを加え合わせた実線Rが実際に観測される抵抗力曲線となる。この抵抗力曲線には平らな底面の錘の場合のように不連続は現われず、D型に属する

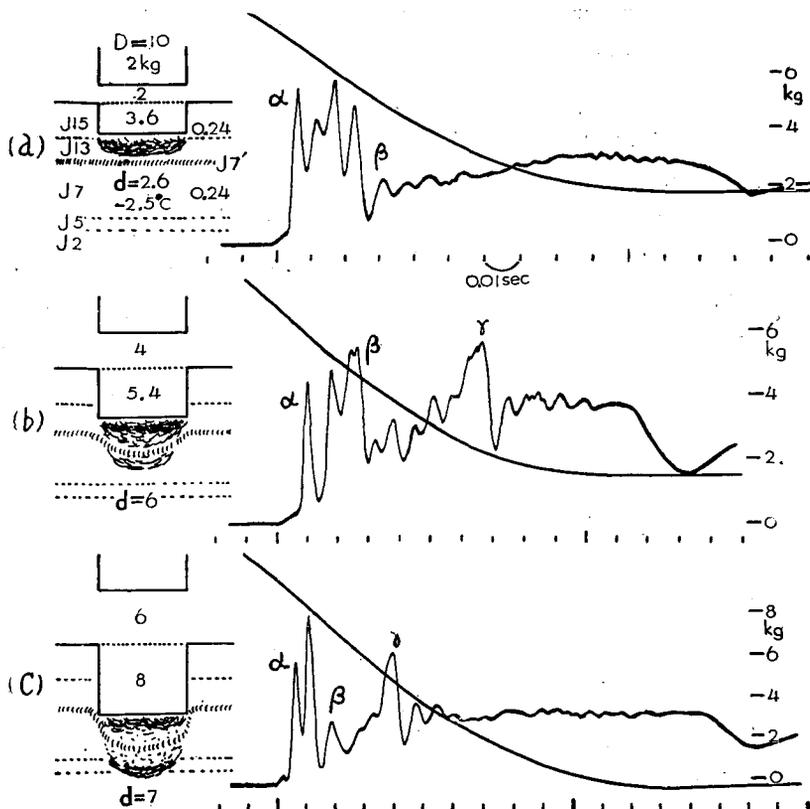
曲線となる。層組織をもつ雪に円錐底面の錘を落したときの抵抗力がD型に属するのは、以上の理由によるものと考えられる。

**AB型** (第13図) 硬いしまり雪では抵抗力が大きく、抵抗力曲線はA型とB型との結合型をとることが多い。硬いしまり雪が出来るのは、積雪が長い期間自重による圧力をうけた後である。その間に雪粒は変形し、粒の角がとれ、粒と粒とをつなぐ氷橋が太くなつて来る。又雪粒もかなりの範囲にわたつて一様化して来ることが多い。このように雪質が一様になることからA型の一定抵抗力の現われる傾向が出て来る。一方、抵抗力に大きな変動の現われるB型の特質は、雪が丈夫なため、間歇的に起る雪の破壊の一つ一つに長い時間かかることに由来するのである。

#### IV. 抵抗力の間歇性

一様な雪の場合であつても、抵抗力曲線には常に細かい変動が重なつているが、この変動は間歇的に現われる衝撃的抵抗力によるものと考えられる。間歇的衝撃力については、吉田が理論的な考察をしている<sup>(4)</sup>。それによると、落下する錘の下に発達した圧縮部の下面におかれて、まだ破壊されていない雪の雪粒同士をつなぐ、氷橋のあるものが破損されると、この破損は一つの氷橋から隣の氷橋へと、Brown運動式に伝わつて行き、そこに、まだ圧縮はうけてはいないが、破損された氷橋を含む弱い構造の破損部分が発達する。破損部分の先端の進みは、氷橋の破損がBrown運動的に伝播することから、 $\sqrt{t}$ に比例することになる( $t$ は時間)。一方、落下する錘の下の圧縮部の下面は $t$ に比例して進行し、破損部分を圧縮部にくりこんで行く。破損部分の先端の進行速度は始めは速いが、次第に遅くなつて行き、少したつと、一定速度で進む圧縮部の下面に追付かれる。ここまでは、圧縮部の下面は破損されて弱くなつた雪に接していたのであるが、破損部分を全部くりこんでしまつたこの瞬間には、新たに無傷な雪と直接に接触し、そこで新しく氷橋を破損するために、大きな衝撃的抵抗力をうける。そして、再び新たに破損された氷橋を出発点として、破損部分が発達し、同じことが繰返される。抵抗力曲線の細かい変動は、このような間歇的衝撃力によるものと考えられる。

氷橋が丈夫な硬い雪では、上記の衝撃力も大きくなり、抵抗力の変動も非常に大きくなる。



第14図 同じ雪塊に高さを色々変えて錘を落した実験 (1956年1月23日)  $\alpha \sim \beta$  は J15 層の破壊のために、 $\gamma$  の山は J7' 層の破壊のために生じたものである。

第14図(a), (b), (c)は、同一の雪質の雪塊について、雪面上異なる高さから錘を落して実験した結果である。三つの反抗力曲線のいずれにおいても、初めの部分  $\alpha \sim \beta$  に大きな変動が現われている。これは丈夫な J15 の層が破壊されたときに現われた反抗力である。錘が J15 層を貫く速度は、(a), (b), (c) の順に大きくなるのであるが、(a) では五つの山が、(b) では四つの山が、(c) では三つの山が現われている。このことは、錘の落下速度が速くなると、間歇的衝撃力のうちのいくつかは合一する傾向があることを示しているが、これも上の理論によつて説明することが出来る<sup>4)</sup>。

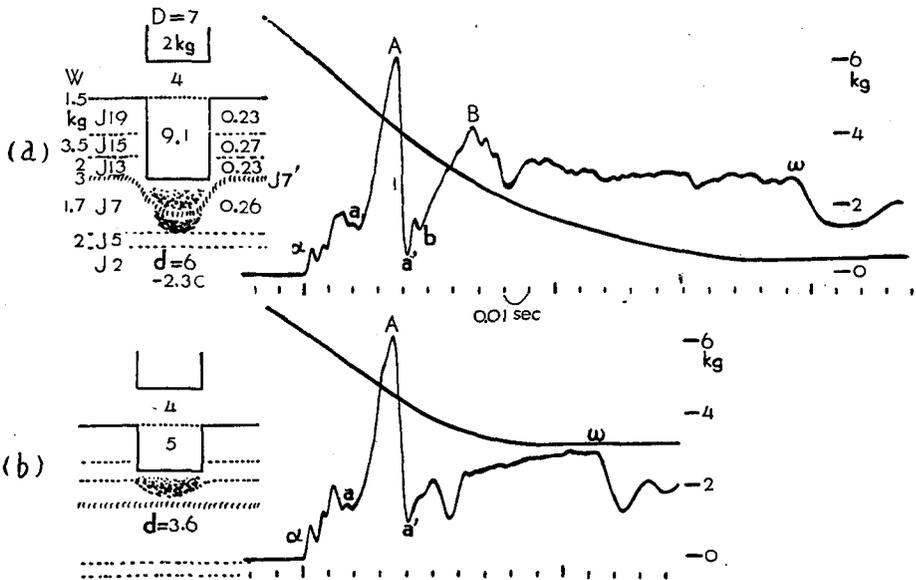
### V. 反抗力曲線と積雪の層状構造との関係

しまり雪でも層状構造が著しい場合には、反抗力曲線が大変動型になることを述べたが、この変動の様子と層状構造との関係を検討してみる。第15図(a)は J19, 15, 13, 7', 7, 5, 2 の七つの層からなる積雪塊についての実験である。各層の丈夫さを表わすひとつの目安として、各層の支持力を断面見取図の左側 W の欄に記入してある。ある層の支持力は、その層より上

の雪を取除いて、この実験に用いた錘の下面と同じ直径の円板を置き、それにかかる荷重を徐々に増して行き、その層が壊れてめりこむ時の荷重の大ききをとつたものである。それで、支持力はその層の静的な反抗力といえる。J15とJ7'とがぬき出て強い。J15は降り積る時に風があつたため強くつめられた層で、又J7'は薄いざらめ雪の層である。

この場合の反抗力曲線には、途中に二つの高い山A、Bが現われている。各々の山の始まりの点a及びbにおける錘の下面の位置を、記録された錘の位置曲線から求めると、雪面下夫々2.1 cm、4.4 cmとなる。又J15、J7'の上面は雪面下夫々4.4 cm、8.8 cmである。一方、錘の下に出来て行く圧縮部分の厚さは、ほぼ錘の沈みに等しい。従つて、a、bにおける圧縮部の下端の位置は夫々雪面下ほぼ4.2 cm、8.8 cmとなる筈で、これはJ15、J7'層の上面の位置とほぼ一致する。従つて、a及びbで夫々J15及びJ7'の破壊が始まると考えてよい。このことが、先ず、Aの山はJ15の破壊のため、Bの山はJ7'の破壊のための反抗であることの第一の理由となる。第15図(b)は、落下する錘の上端に糸を結びつけ、錘の下に発達する圧縮部の下面がJ7'に達する直前で、糸が伸びきり、錘の落下が止まるようにした実験の結果である。こうすると、破壊がJ7'に及ばないので、その反抗力曲線にAの山は現われるが、Bの山は現われない筈である。そして実際にそうなつた。これによつても、A、Bの山が丈夫な層J15、J7'によるものであることが確められる。

このように、積雪層の中に特に丈夫な層があると、それに対応して反抗力曲線に高い山が



第15図 J15、J7'の二つの強い層を含む雪塊についての実験(1956年2月3日)  
 (a) A、Bの二つの山は夫々J15層、J7'層の破壊のために生じたもの  
 (b) (a)と同じ実験であるが、落下する錘が途中で止まるようにして、破壊がJ7'層迄は及ばないようにした。Aの山は現われるがBの山は現われない。

現われる。これを規準として、反抗力曲線のどの部分がどの層に対応するかが定められることが多い。例えば第15図(a)の反抗力曲線の部分  $a \sim a$  は J19,  $a \sim A$  は J15,  $a' \sim b$  は J13,  $b \sim B$  は J7',  $B \sim \omega$  は J7 の破壊に夫々対応する。

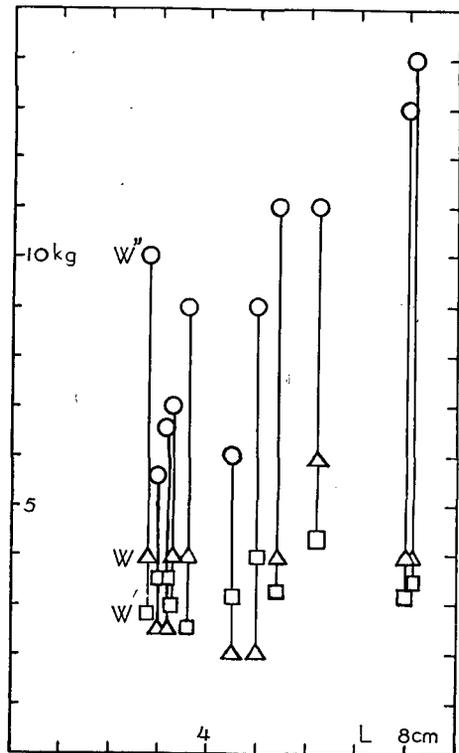
### VI. 落下する錘で作られた穴の底の強さ

一度荷重をうけて破壊陥没した雪が始めより強くなることは、藤岡<sup>12)</sup>、斎藤<sup>13)</sup>などの実験から知られている。筆者は、雪の中に錘を落下させる実験の結果をもとにして、上記の現象に次のような考察を試みた。

今迄に掲載して来たいくつかの反抗力曲線を見ると、落下する錘が最後に雪に支えられて止まる暫く前から、反抗力曲線はほぼ水平に走るようになっていくのに気がつくであろう。このときの反抗力の値を  $W'$  で表わすと、 $W'$  は錘の自重の約二倍位の大きさである。そして、錘が止まった瞬間に、反抗力は急に  $W'$  から錘自重の大きさに下る。雪の反抗力は、錘の下に発達した圧縮部にその周りの破壊されていない雪が及ぼす力である。従つて、 $W'$  は錘が停止する直前、まだ低速度で運動している錘に対する、破壊されていない雪の強度を表わすものである。即ち、 $W'$  は錘が停止するときその下に発達した圧縮部を支えている、最下層の雪層の強度である。しかし、 $W'$  は低速度で運動しつつある錘に対する強度であつて、前に V. で説明した静止強度とは違う。今、この最下層の雪層について測定された静止強度を  $W''$  としよう。

落下した錘で作られた穴の底に板をおき、それに加わる荷重を、徐々に増して底が陥没するときの荷重を測定すれば、穴の底の静止強度  $W''$  が得られる。第16図は、色々の雪について得た  $W$ ,  $W'$ ,  $W''$  の関係を表わしている。横軸は穴の深さである。三角印が  $W$ , 四角印が  $W'$ , 円印が  $W''$  を表わし、縦線で結ばれた組が同一の雪についての測定値である。運動する錘に対する雪の強度  $W'$  と、静止強度  $W''$  との差は余り大きくはない。穴の底の静止強度  $W''$  は  $W$  や  $W'$  に比べて非常に大きく、それらの2倍乃至3倍、或いはそれ以上の値をもっている。これに対しては、次のような説明がなされるであろう。

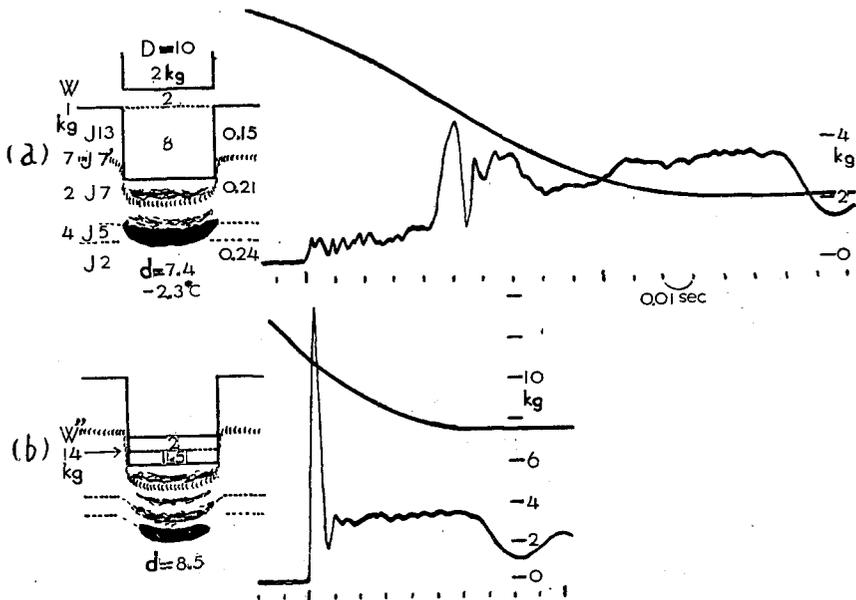
錘が穴を作つて静止すると、穴の底からあ



第16図 Lは凹んだ雪の深さ。W''は凹んだ雪の支持力。Wは圧縮部下面の層の支持力。W'は錘がとまるときの最終反抗力

る深さ迄を形成している圧縮部も、静止するが、圧縮部の側面は、静止している間にその周りの雪と強く融合する。先に III. で述べたように錘が落下を続けている間は、圧縮部の側面に働く抗剪力は小さいのであつて、落下中の錘の反抗力は主として、圧縮部の底面に働く圧力抵抗である。 $W'$  は破壊された雪が圧縮部の底面に及ぼす圧力抵抗なのであつた。又、静止強度  $W$  はまだ破壊をうけていない雪の強度であつて、破壊によつて圧縮部を作り出すための最小の力を示すのであるから、 $W$  は純粋な圧力抵抗である。これに反して、 $W''$  は圧縮部の底面の圧力抵抗と、その側面の抗剪抵抗とに打勝つべき力を表わすのであるから、 $W$  や  $W'$  よりも大きくなるわけである。

従つて、一度錘を落して作った穴の底に、再度錘を落して反抗力曲線をとれば、最初に既存の圧縮部の側面における融合を断ち切るために大きな力が現われ、その後は運動する錘に対する反抗力  $W'$  が続くことになる筈である。実際にそのことが第 17 図 (a), (b) に示されている。(a) は第一回の落下のときの反抗力曲線で、(b) は第一回の落下で出来た穴の底に、再度錘を落したときの反抗力曲線である。



第 17 図 (a) の実験では深さ 8 cm の穴が出来たが、(b) の実験ではその穴の底から 2 cm 離して再び錘を落した。 $W''$  は (a) の実験で凹んだ雪の支持力 (1956 年 1 月 16 日)

## VII. 積雪の強さ

以上、雪の中に落下する錘が雪を破壊するとき、雪からうける複雑な反抗力の様相について述べて来た。一般に、物体の強さというものは、その物体を破壊するのに必要な力で表わされるから、積雪の強さも、この錘がうける反抗力の大ききで表わしてもよいであろう。しか

し、既に述べたように、この反抗力は変動が激しいので、雪の強さを表わすとすれば、反抗力の平均値を使うのが適切であろう。

反抗力の平均値としては、色々な平均値が考えられるが、ここでは最も簡単な時間平均  $\bar{R}_t$  と位置平均  $\bar{R}_x$  とをとることにする。 $\bar{R}_t$ 、 $\bar{R}_x$  は夫々次のようにして求められる。

錘が落下し始めてから雪面に達する迄の時間を  $T'$ 、雪面に達してから雪の中で止まる迄の時間を  $T$  とすると、錘が落下し始めてから止まる迄に、重力は錘に  $Mg(T'+T)$  の力積を与える。 $M$  は錘の質量、 $g$  は重力の加速度である。錘が雪面に達してからは、雪からの反抗力  $R$  が働き、錘が雪の中に止まる迄に  $\int_0^{T'} R dt$  だけの力積を錘に与える。この  $\int_0^{T'} R dt$  が  $Mg(T'+T)$  を打消したために錘が止まるのであるから、 $\int_0^{T'} R dt = Mg(T'+T)$  なる関係がある。一方、 $\bar{R}_t = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} R dt$  であるから、

$$\bar{R}_t = Mg(T'+T)/T \quad (1)$$

になる。従つて、 $T'$  と  $T$  とが知られば、 $\bar{R}_t$  は直ちに計算出来る。 $T'$ 、 $T$  は雪の反抗力のオツシログラムから容易に求められる。

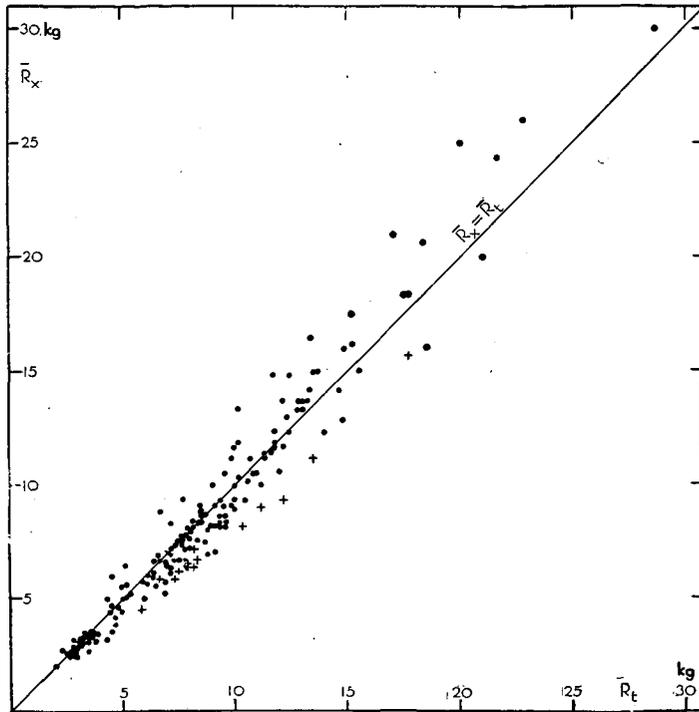
錘が雪面上  $h$  cm から落下して、雪の中に  $D$  cm 沈んで止まつたとする。この間に重力は  $Mg(h+D)$  だけの仕事をする。一方、錘は雪に対して、雪面から鉛直下方に  $x$  をとると、 $\int_0^D R dx = D\bar{R}_x$  の仕事をし、これは重力のなした仕事に等しくなければならない。従つて、

$$\bar{R}_x = Mg(D+h)/D \quad (2)$$

となる。 $h$  及び  $D$  は簡単に測定される量である。

$\bar{R}_t$  と  $\bar{R}_x$  とは意味の違う平均値である。かりに、反抗力  $R$  が  $x$  だけの函数であるとする、 $\bar{R}_x$  は当初の意味のままの位置平均であるが、 $\bar{R}_t$  は  $R$  を錘の落下速度  $v$  で割つたもの、即ち  $R/v$  の位置平均に  $T/D$  を乗じたものに等しくなる。従つて、このような場合には  $\bar{R}_t$  と  $\bar{R}_x$  とはかなり異なる値を持ち得るのである。更に、第 14 図であげた例によつても解る通り、反抗力  $R$  は錘の落下速度の大小によつて変る。このことも  $\bar{R}_x$  と  $\bar{R}_t$  との不一致の原因となり得る。しかし、実際に、第 18 図のように、実測された  $\bar{R}_x$  と  $\bar{R}_t$  との値の間関係を表わしてみると、実測点は大体直線  $\bar{R}_x = \bar{R}_t$  の近くに分布して、両平均値の間にそれほど大きな値の差はないことを示す。しかし、もう少し詳しくみれば、次のようなことが云われる。第 18 図の黒円印は平らな底の錘の場合、十字印は円錐形の底の錘の場合を表わしている。平らな底の場合、 $\bar{R}$  が比較的小さいときには、直線  $\bar{R}_x = \bar{R}_t$  の下側にある点の数が上側にあるものより多いから、雪が軟かい場合には、 $\bar{R}_t$  の方が多少  $\bar{R}_x$  より大きくなる傾向があるわけである。雪が硬くなつて  $\bar{R}$  が大きくなると、これとは逆の傾向が現われる。円錐形の底をもつた錘の場合は、実測点は例外なく直線  $\bar{R}_x = \bar{R}_t$  の下にあり、しかも直線からの距りも大きい。従つて、この場合には、 $\bar{R}_t$  の方が  $\bar{R}_x$  より常にかなり大きな値をもつことになる。

雪の硬さや強さを実際に野外で測定する方法としては、現在次のような方法がとられている。カナダでは、hardness meter<sup>(4)</sup> と呼ばれる機械が使われている。雪の上に円板を置いて、



第 18 図 位置平均の反抗力  $\bar{R}_x$  と時間平均の反抗力  $\bar{R}_t$  との関係。雪の温度  $0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 。+印は錘の下面が円錐形のもの

それをこの機械で 30 cm sec 位の速度で雪の中に押しこみ、そのとき機械のスプリングに現われる反抗力を雪の硬さとする。又スイスでは、Rammkegel と呼ばれる頂角  $60^{\circ}$ 、底面の直径 4 cm の円錐体を雪の中に打込んで、始めの雪面上の高さ、めりこんだ深さ、円錐体の重量から (2) 式によつて雪の平均反抗力  $\bar{R}_x$  を計算して、これを Rammwiderstand<sup>(19)</sup> とよんで雪の硬さの指標としている。

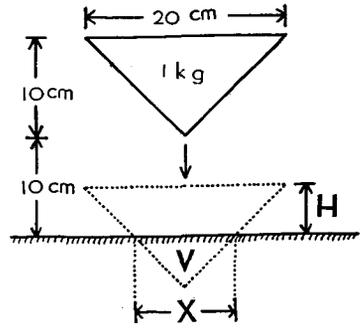
日本では、黒田式硬度計<sup>(19)</sup> が広く用いられている。これは第 19 図に示すように、重さ 1 kg の円錐を雪面上 10 cm から落す方法であるが、硬度を示す指数としては、第 19 図の  $H(\text{cm})$  か  $X(\text{cm})$ 、又は重力がなした仕事  $Mg(20-H)$  と雪の中にめりこんだ円錐部分の体積  $V$  との比を使つている。同じ雪について、黒田式硬度計で求めた  $H(\text{cm})$  と、円筒形の錘を落して定めた  $\bar{R}_x/S$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ,  $S$  は円筒形の断面積) とを求め、両者の間の関係を示したのが第 20 図である。この関係は直線関係ではなく、ほぼ

$$\bar{R}_x/S = 10^{\frac{H-8.3}{4.7}} \quad (3)$$

で表わされる。但し、この式の  $\bar{R}_x/S$  と  $H$  は、夫々  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 、 $\text{cm}$  の単位で表わされてある。

周知のように、硬さというものは一義的に定められる物理量ではなく、硬さなるものを測

定しようとするときに使われる方法によつて色々違つて来る。しかし、硬さという概念は物を壊すのに要する力と密接な関係があるように思われるので、筆者は、上に説明した平らな底の錘を落したときの  $\bar{R}_x$  か  $\bar{R}_t$  かを雪の硬さとして用いるのが、最も適していると思う。錘の断面積  $S$  で  $\bar{R}$  を割つたものは更によいであろう。この点で、カナダで用いられている hardness meter も推奨すべきものとする。ただ、 $\bar{R}_x$  と  $\bar{R}_t$  とのうち、どちらが適当かとの問題が残るが、さし当り、両者の差は余り大



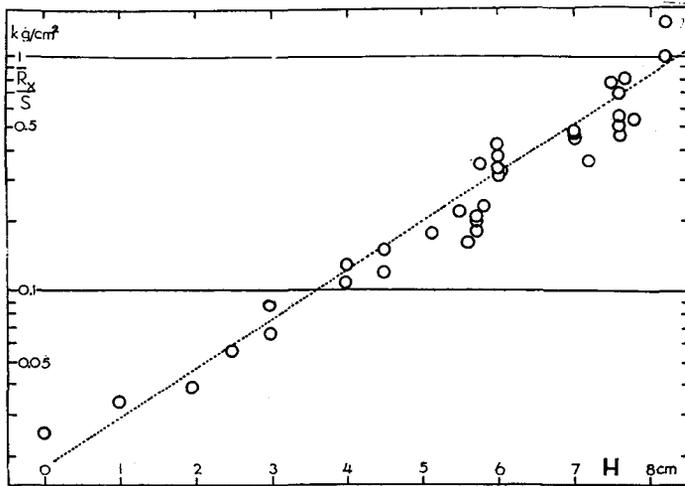
第19図 黒田式硬度計

きくはないことを理由として、求め易い  $\bar{R}_x/S$  をとるのがよいであろう。黒田式硬度計もスイスの Rammkegel も、共に円錐形で雪を破壊するので、それで決められた硬さには雪の上層部の硬さの方が下層部の硬さに比べて、強くきいているという欠点がある。筆者の行なつたような平らな底の円筒を落下させる方法ならば、このような欠点はない。

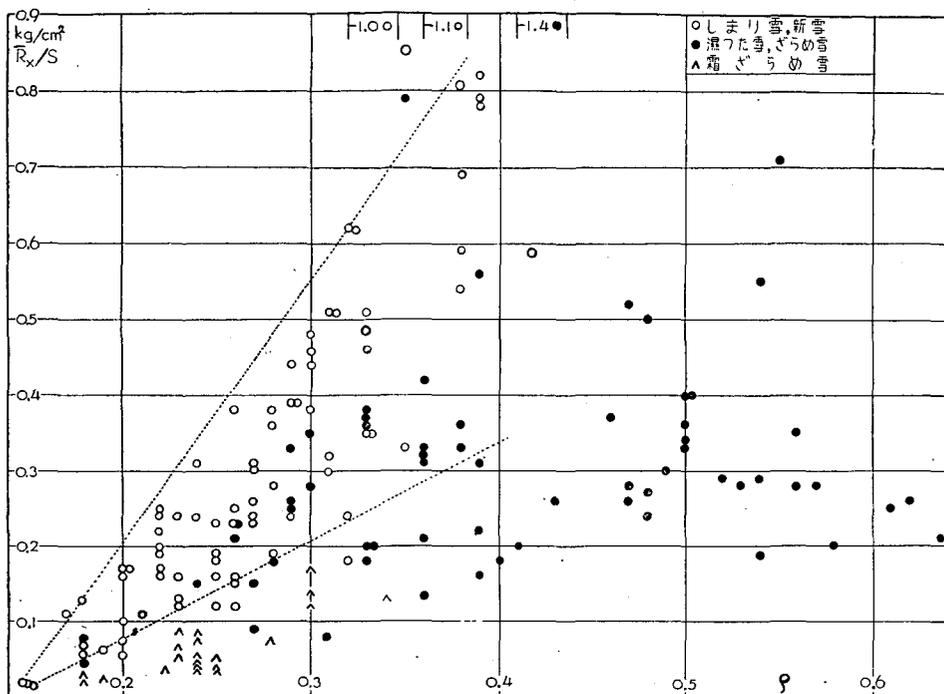
第21図は雪の強さ  $\bar{R}_x/S$  が、雪質や密度とどんな関係があるかを示すために書いたものである。横軸に密度を縦軸に強さ  $\bar{R}_x/S$  をとり、雪質の違いを三種類の異なる記号で表わしてある。全体として、密度が大きくなると共に強さが増す傾向が見られるが、同じ密度に対しては、しまり雪が最も強く、次がざらめ雪で、霜ざらめ雪が一番弱い。しまり雪の密度と  $\bar{R}_x/S$  との関係は、 $\bar{R}_x/S$  を  $\text{kg/cm}^2$ 、 $\rho$  を  $\text{gr/cm}^3$  の単位で表わせば、

$$3.5(\rho - 0.14) > \bar{R}_x/S > 1.3(\rho - 0.14)$$

で与えられる。湿つたり、ざらめ雪になつたりすると、密度が大きくても  $\bar{R}_x/S$  は割合に小さ



第20図 平均抵抗力  $\frac{\bar{R}_x}{S}$  と黒田式硬度計で求めた硬度  $H$  との関係。



第21図 平均抵抗力  $\frac{R_x}{S}$  と密度  $\rho$  との関係。雪の温度  $0^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 。

い。霜ざらめ雪の密度は一般に余り大きくはないが、それにしても  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  を越えない。尚参考のために、氷の圧縮破壊強度は  $20 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$  であること<sup>17)</sup> を書きそえておく。

終りに、この研究に際し、御指導下さった吉田順五教授、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なわれたものである。

#### 文 献

- 1) 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**, 13.
- 2) ----- 1955 衝撃による積雪の破壊 I. 低温科学, 物理篇, **14**, 95.
- 3) ----- 1956 衝撃による積雪の破壊 II. 低温科学, 物理篇, **15**, 149.
- 4) Yosida, Z. and Colleagues 1957 Physical studies on deposited snow. III. Mechanical properties. (2). Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No. 11, 1.
- 5) 小島賢治 1955 積雪層の粘性圧縮 I. 低温科学, 物理篇, **14**, 77.
- 6) ----- 1956 積雪層の粘性圧縮 II. 低温科学, 物理篇, **15**, 117.
- 7) ----- 1957 積雪層の粘性圧縮 III. 低温科学, 物理篇, **16**, 167.
- 8) Yosida, Z. and Colleagues 1956. Physical studies on deposited snow. II. Mechanical properties. (1). Contributions from the Institute of Low temperature Science, No. 9, 15.
- 9) 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.

- 10) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科学, **12**, 1.
- 11) 吉田順五 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, **10**, 1.
- 12) 藤岡敏夫 1950 積雪がものを支える力. 低温科学, **3**, 109.
- 13) 斎藤鍊一 1947 積雪の荷重物体支持について (1), (2), (3). 雪氷, **9**, 6, 40, 74.
- 14) Gold, L. W. 1956 The strength of snow in compression. Journ. of Glaciology, **2**, 719.
- 15) Haefeli, R. 1933 Der Schnee und seine Metamorphose. Kapitel II. Schneemechanik mit Hinweisen auf die Erdbaumechanik. Beiträge z. Geolo. Schweiz, Hydro., Lief., **3**, 63.
- 16) Kuroda, M. 1929 Mechanical properties of snow layer. Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, Tokyo. **12**, 69.
- 17) Butkovich, T. R. 1954 Ultimate strength of ice. Research paper 11, S.I.P.R.E.

### Résumé

A body dropped onto snow is acted upon by the resisting force  $R$  of snow while the body is descending within it. Such a resisting force was registered by an electromagnetic oscillograph forming a part of the experimental equipment shown in fig. 1 of the text. The mode of the change in the resisting force could be classified into five types schematically illustrated in fig. 5. The types of the resisting force and the sorts of snow which exhibited each type respectively are:

1. **A-type** Uniform soft compact snow (fig. 9) and block of snow placed sideways so that the snow layers composing it stood upright. (fig. 8(b)).
2. **B-type** Wet granular snow. (fig. 10).
3. **C-type** Compact snow. (fig. 8(a)).
4. **D-type** Soft fresh snow. (fig. 11(a)). When the flat bottom of the falling body was replaced by a conical one with its apex downwards, this type was found also in case of compact snow. (fig. 11(b)).
5. **AB-type** (A middle type between **A** and **B**) Firm compact snow and granular snow. (fig. 13).

The resisting force  $R$  arises from two different causes (fig. 6): the one is the pressure resistance  $P$  which acts on the base of the region of compressed snow developed underneath the falling body and the other is the shearing force  $Q$  which acts on its boundary side surface. It was confirmed by a specially devised experiment that  $P$  increased gradually from a small value to a large one during the fall of the body within the snow while  $Q$  appeared with a large value at the very first to decline suddenly to a small value. (fig. 7). On the basis of such characters of  $P$  and  $Q$ , some discussion was presented on the appearance of the above-mentioned five types of manifestation of the resisting force.

When the snow was composed of several snow layers of different character, the resisting force used to show a few peaks in its curve. It was confirmed experimentally that the peaks appeared at the instant when especially strong layers existing in the snow were broken down. On the basis of such a correspondence between the peaks and the strong layers it could be determined which part of the resisting force was caused

by which of the snow layers. (fig. 15).

The static strength of the bottom of the hole made by the falling body was found to be much larger than that of the deepest snow layer reached by the region of compressed snow. The resisting force commenced with a very steep large peak at the second fall of the body onto the bottom of the hole. (fig. 17).

The mean value of the resisting force  $R$  of snow may be used as a measure of its mechanical strength. Time mean value  $\bar{R}_t$  is equal to  $Mg(T'+T)/T$ , where  $Mg$ ,  $T'$  and  $T$  denote respectively the weight of the falling body, the time intervals from the beginning of the fall of the falling body to the instant of its first contact with the snow surface and from that instant to that of its arrest by the snow. Space mean value  $\bar{R}_x$  is given by  $Mg(h+D)/D$ , where  $h$  and  $D$  denote respectively the height above the snow surface from which the falling body is dropped and the depth at which it is stopped.  $\bar{R}_t$  was found to be almost equal to  $\bar{R}_x$  in the case of a falling body with a flat bottom while in the case with a conical bottom the time mean value  $\bar{R}_t$  was without exception larger than space mean value  $\bar{R}_x$ . (fig. 18).

The relation between the mechanical strength of snow  $\bar{R}_x/S$  ( $S$ : the area of the bottom of the falling body) and the snow density  $\rho$  is shown in fig. 21 with different marks for different kinds of snow. In the case of compact snow the larger the density, the stronger it becomes and the following relation between  $\bar{R}_x/S$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) and  $\rho$  ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) is found:

$$3.5(\rho-0.14) > \bar{R}_x/S > 1.3(\rho-0.14).$$