HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	衝撃による積雪の破壊　II
Author(s)	木下, 誠一
Citation	低温科學. 物理篇, 15, 149-169
Issue Date	1956-11-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17919
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p149-169.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Seiiti KINOSITA 1956 Break-Down of Snow by Impulsive Force. II. *Low Temperature Science, Ser. A, 15.* (With English résumé p. 165)

衝撃による積雪の破壊 II*

木下誠一

(低温科学研究所　応用物理学部門)

(昭和31年8月受理)

I. 緒　　言

吉田・黒岩[1]及び筆者[2),3)]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。これまでに，色々な結果が得られたが，簡単にまとめると，次のようである。

(1) 破壊の際に雪が及ぼす抵抗には，一般に，破損抵抗，速度抵抗，圧縮抵抗の三種類が考えられる。

(2) 反抗力—時間曲線には，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。

(3) 圧縮量 a gr (落下した錘が雪の中にめり込んだ体積と始めの雪の密度との積) と，それに要した衝撃エネルギー w kg-wt·cm (落下に費した錘の位置エネルギーの変化量) との間には，普通のしまり雪やざらめ雪について $a/w=0.5\sim3$ gr/kg-wt·cm の関係がある。

今年度 (1955～1956年の冬期間) の積雪についても，これまでと同じような実験を行なつたが，特に今年度の実験では，破壊が進行して行く過程に於て，次々に現われて来る反抗力と，積雪の層構造との関聯に重点をおいた。即ち，予め各積雪層の強さ (静的にその層を破壊する時の力即ち支持力) を測定しておいて，衝撃で破壊がその層に及んだ時に生ずる抵抗と，その層の強さとの関係を調べたのである。

今年度の積雪層の状態については，小島の詳しい報告[4)]がある。今年度は積雪量が少なく，初冬期に積雪内の温度勾配が急であつたため，霜ざらめが出来，又雨の降ることが屢々あつたため，例年のような厚い一様なしまり雪の層は出来なかつた。従つて例年とは大部性質の違う積雪について実験することになつた。以下その概要について述べる。

II. 実 験 装 置

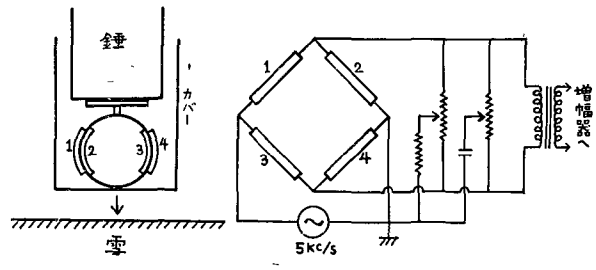
落下する錘が雪から受ける反抗力と，錘の位置とを電流に変えて，電磁オツシログラフに

* 北海道大学低温科学研究所業績　第345号

記録したわけであるが，その方法は前年度[3]と同じであつた。力の測定には，落下する錘の下部にアルミニウム板製の円筒カバーを被せ，錘とカバーとの間に強い鋼の輪をとりつけ，カバーにかかる雪の反抗力による輪の変形を，ストレンゲージを用いて電流に変えたわけであるが，今年度はこの輪にとりつけるストレンゲージを2箇から4箇に増した。即ち第1図の左側の図のように，輪の内側と外側とにストレンゲージを夫々2箇づつはりつけ，それを第1図の右側の図のようなブリッジに組んで感度をあげるようにした。用いたストレンゲージはK-3である。

錘，鋼の輪，カバーからなる振動計の固有週期よりも短い時間の間に起る反抗力の変化に対しては，力の記録が忠実に現われないことについては，前回の報告[3]で述べた。今年度は，円筒カバーの質量を昨年度より50 gr程減じて50～70 grとした結果，測定系の固有週期は昨年の1/150 secより1/200 secに減つた。減衰因子は昨年度のものと大体同じであつた。従つて今回の測定では，1/100 secの時間に起る力の変動までは，忠実に記録出来たわけである。

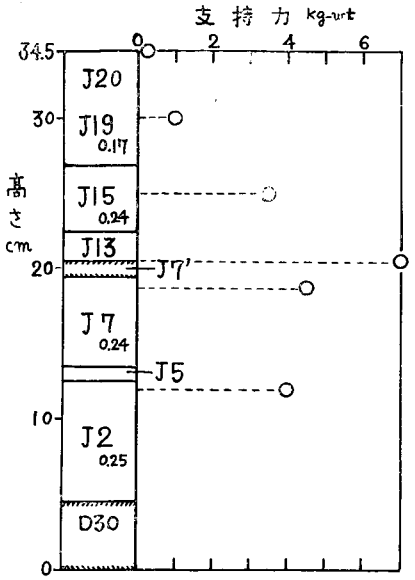
円筒カバーは直径7 cmであるが，今年度の積雪は一般に軟かつたため，カバーの底面に更に直径10, 14 cmの円板をつけて（前述のカバーの質量はこの円板の質量をも含めた値），カバーから雪に及ぼされる圧力を小さくした。錘としても軽い2 kgの眞鍮円筒を用いたので，カバー底面の静圧力は0.013～0.05 kg-wt/cm²という小さなものであつた。



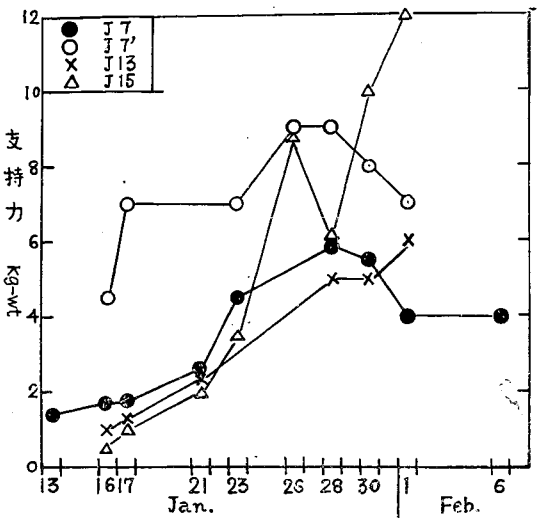
第1図 反抗力測定装置略図．ストレンゲージ1, 2, 3, 4とそのブリッジ結合。

III. 測 定 結 果

今年度の積雪の状態の一例として，1月23日の積雪断面を第2図に示す。図の左側のJ 20, J 19等の記号は，夫々一つの積雪層を示すもので，例えばJ 13は1月13日に降つた雪からなる層である。従つて図の左側は，各積雪層と地面からの高さとの関係を示すものである。又層の所に書かれている0.17, 0.24等は夫々の層の密度である。右側に，この日の積雪層の数箇所で測定した支持力の値を示してある。一つの層の支持力は次のようにして側定された。即ち，その層から上の積雪を取除いて，その層をむき出しにして平らにし，その上に直径10 cmの円板を置く。この上に静かに次々と錘を加えて行くのであるが，錘の目方がある値になると，急にその層が破壊して，錘が円板と共に下にめり込む。この時の錘の目方が直径10 cmの円板に対する支持力の値である。この支持力の値は層の強さを指示する一つの目安となるものだが，錘をのせる板の型や大きさ等で違うことが知られている[5],[6]。ここではその日用いた衝撃実験用の錘の下面と同じ直径10 cmの円板を用いたのである。



第2図 1月23日の積雪断面図。J 20, J 19は新雪, J 15, J 13はしまり雪, J7′, D 30はざらめ雪, J 7, J 5, J 2は霜ざらめ。数字は積雪密度。円印は直径 10 cmの円板に対する積雪支持力の値。



第3図 支持力変化図

J 7の霜ざらめの層では，上のJ 13のしまり雪の層との境界に，強いざらめ雪の層が薄く出来ているが，この層を特にJ 7と区別してJ 7′としてある。J 20, J 19が新雪，J 15, J 13がしまり雪，J 7, J 5, J 2が霜ざらめ，D 30がざらめ雪である。(層の記号はその層の出来た日附によつてつけてある。D 30は12月30日に，J 15は1月15日に出来た層を意味する。) これらの各層の今年度における消長の過程については，小島の論文[4]を参照されたい。尚J 7, J 7′, J 13, J 15の各層の支持力が冬期間中にどのように変つて行つたかを第3図に示す。1月28日にJ 15の支持力が一時小さくなつているが，これはこの日に降つた雨がしみこんだためである。又2月4日に再び雨が降つて，積雪層を通り抜けて地面にまで達したので，その後は積雪層の各所に氷粒や氷板が出来て，積雪全体が不均一になつた。このため，全体としての支持力は急激に増したようにみえたけれども，不均一性のため一つの層を代表するような支持力の値は得られなかつた。

落下する錘に及ぼされる積雪の反抗力のオツシログラムの若干を本文の後にまとめて示してある (第I～XII図)。各オツシログラムの左側にある積雪断面の見取図は，昨年度[3]と同じく落下する錘がめり込んで止まつた後の，積雪塊の断面を切つて色水検査をし，それを写真にとつてその印画から書き写したものである。オツシログラムでは，時間は左から右に進み，最下段の一列に並んだ点と点との間が0.01 secである。第I図について説明すると，途中のY点から急上昇する曲線が反抗力の記録，左上のX点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。反抗力の曲線はZ点から後は減衰振動の形になつているが，このZ点で錘が止まつたと考えてよいことを前の論文[3]で述べた。錘の下面（円筒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Y点までは，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が，それから後，右の方の部分は積雪の反抗力が作用するため，下に向つて凸になる。Y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わす曲線である。

雪塊の断面の見取図に書き入れてある記号の意味は次の通りである。例えば，第I図で，錘の下面と雪面との間にある1.2は，雪面上1.2 cmの高さから錘を落したことを示し，雪面の下の凹んだ部分に書いてある6.2は，凹みの深さが6.2 cmであることを示す。又dは圧縮部分即ち錘の下の圧縮された雪の厚さをcm単位で表わす。左側のJ7, J5, J2は積雪の各層の名称で，右側の0.15, 0.17等はそれを書き入れてある所の層の密度である。又第II図の最左側の列にWとして書かれている数字は，夫々の層の支持力の値(kg-wt)である。尚，この支持力の値は，錘の下面と同じ大きさの面についての値である。J13とJ7の間にWの値として7という大きな値が書いてあるが，これは，第2図に示したJ7′のざらめ雪の薄い層についてのものである。又，a/wの値は単位衝撃エネルギーに対する凹んだ雪の質量(gr/kg-wt·cm)，即ちめり込んだ錘によつて，雪の中に作られた穴の中に初めにあつた雪の量を，錘が雪に与えたエネルギーで割つたもので，雪の軟かさを表わす目安と考えることが出来る。(**I. 緒言** の (3) 参照)。

第I～IX図の例からも解るように，今年度の実験は，層構造の著しい積雪塊について行ない，落下する錘の影響範囲が幾つかの層にまたがることが多かつたので，反抗力曲線のうち，昨年度の層構造の弱い積雪塊について得られたような4つの型[3]の何れかに分類されるものは非常に少なかつた。ここにあげた例のうちでは，第I図が階段型，第VII図が一定型に入れられるだけである。第I図の雪は，まだ降つて間もない割合一様な軟かいしまり雪で，層構造が弱かつたため，階段型に分類されたのであろう。又第VII図では，第I図と同じJ7～J2層についての実験であるが，この時には，これらの層がすつかり霜ざらめになつていた。一定型の抵抗曲線は，昨年度の実験[3]では，錘の落下の方向に雪が極めて一様なときに現われたが，この場合でも，始めは性質の違つていたJ7～J2の層が，全部霜ざらめに変化して一様な性質のものとなつたために，このような一定型の反抗力曲線が現われたのであろう。

第II図では，J13とJ7の層の間にあるJ7′の丈夫な薄いざらめ雪の層を，錘がつきぬけているため，反抗力曲線の途中に高い山Aが現われている。この高い山でJ7′層が破壊され，その後の余り変動のない部分で，J7, J5, J2の層が破壊されているのであろう。J7～J2の層は，この時既に少し霜ざらめ化しているので，第VII図の反抗力曲線と同じく変動が少ない。破壊が強い層をつきぬける時に高い山が反抗力曲線に現われる例は，第V, VI, VIII, IX, X図の場合にも見られ，それらをすべて記号Aで示してある。

錘のめりこんだ雪塊を二つに切つて，その切口に色水をかけると，層構造の乱された有様

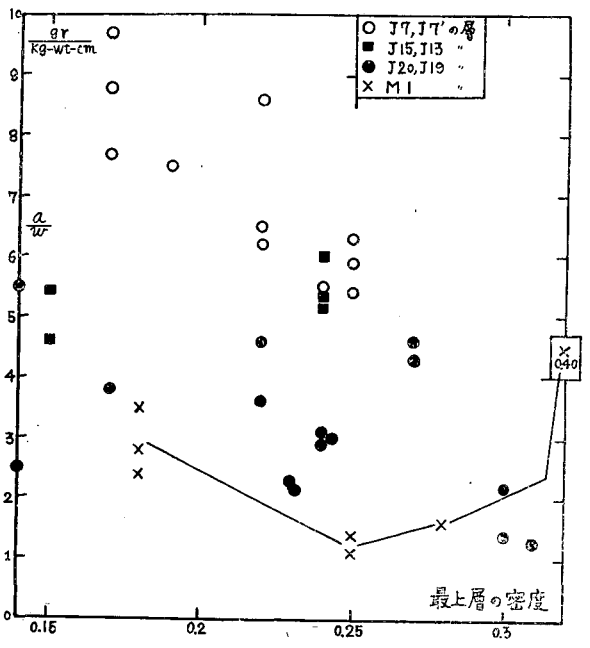
や錘の下の圧縮部分が色模様として現われるのが普通であるが，今年度は，昨年度のようにはつきりした色模様が得られず，図のような漠然とした色模様しか得られなかつた。しまり雪や新雪の場合は，圧縮部分は錘の眞下に限られて，それから外側には余りはみ出ていない。併し，ざらめ雪では，境界が余り明瞭ではないが，圧縮部分はかなり外側にはみ出て拡がつているようである。このことは次のことからも考えられることである。例えば，第X図のざらめ雪の層Wの厚さは始め4 cmであつたものが，錘の下の圧縮部分の中では1.5 cmとなつた。もし外側に拡がらないとすると，この部分の密度は，始めの密度0.36の4/1.5倍，即ち0.96にもならなければならない。従つて，このざらめ雪の粒子はかなり外側に流動したと考えなければならない。このようなことが，積雪採集円筒で積雪を取るときにも起ると考えられるので，途中にざらめ雪の層がある場合には注意を要するわけである。

IV. 圧縮量と衝撃エネルギーとの関係

今年度の実験について得られたa/w (I. 緒言の(3)参照) の値について検討してみる。圧縮量a grは，錘がめり込んだために凹んだ部分の雪の質量，衝撃エネルギーw kg-wt·cmは，錘が雪に与えたエネルギーの値である。a/wが雪の軟かさを示す量であることは，前の論文[3]で述べた。普通のしまり雪では，a/wが0.5～2，ざらめ雪では1～3，新雪では1.5以上であることが，これまでの実験で得られた結果である。

先にも述べたように，今年度の実験に使つた雪は，比較的薄い層の重なつた雪についてのものである。aの値は，錘が雪の中にめり込んだ体積Vに，始めの雪の密度ρをかけたものであるが，層状組織の雪の場合は，ρがVの中で一様ではない。従つて，aの値も，密度ρの不均一性を考慮して計算しなければならない。このようにして得られたa/wの値を，最上層の密度に対して書いたのが，第4図である。積雪の密度は時間がたつと一般に増加するので，第4図の横軸は積雪層が出来てからの経過時間を表わすものと見てよい。

昨年度は主に一様な密度の雪について実験を行ない，a/wと密度と



第4図　$\frac{\text{圧縮量}}{\text{衝撃エネルギー}}\left(=\frac{a}{w}\right)$と最上層の密度との関係

の関係を文献(3)の第10図に示したが，今回の第4図の関係も，傾向に於てはそれと同じである。ただ全体にわたつて，今年度は昨年度に比べて，a/w の値が大きくなつた。即ち，雪が全体として昨年に比べて軟いわけである。これは，今年度は，積雪が少なくて寒気がきびしかつただめ，積雪層の中に強い温度勾配が出来て，霜ざらめがよく発達したためである。

例えば，J7, J7′の層（第2図参照）について行つた実験では，a/w の値として5～10という非常に大きな値が得られた。これは，J7の層とその下のJ5, J2の層が新雪のうちから大きな温度勾配をうけたため，普通のしまり雪にならずに霜ざらめ化したからである。霜ざらめがこのように衝撃に対して弱いことはよく知られていることである。その内部の粒子構造との関聯については，小島の論文[4]で取扱つてある。

J7, J7′層の上のJ15, J13及びJ20, J19の層は，外見上は，J7, J5, J2の層のように霜ざらめ化はしないで，普通の積雪変化の経過をたどつた。併し，a/w の値をとつてみると，1～6という大きな値が得られ，或程度の霜ざらめ化が行われていたものと想像される。2月4日以後，密度が0.3近くなつたとき，a/w の値が1～2と小さくなつたのは，氷粒などが混つて強くなつたためである。

融雪期近く3月1日に降つたM1層は，a/w の値として，新雪のときに2.4～3.5，しまり雪になつて1～1.5，大粒のざらめ雪になつて4.5の値を示し，普通の状態において積雪が示す値であつた。

V. 積雪の層構造と反抗力曲線との関係

錘が雪の中にめり込んで行く過程で，積雪層が次々と破壊され，そのために，反抗力曲線に一連の山や谷が現われるのであるが，ここで反抗力曲線と層構造との関係を調べてみる。

例えば，第VIII図では，左側の積雪断面図から解るように，破壊がJ19, J15, J13, J7′, J7と進み，丁度J7とJ5の境で終つている。各層の静的支持力 W（直径7cmの円板に対する値）の数値が図に示されているが，J15とJ7′の W は夫々その上の層の W よりも大きい。従つて，錘の下に発達した圧縮部分が，これらの層に達した瞬間に，反抗力は不連続的に増大して，そこで反抗力曲線に大きな山が現われるであろう。第VIII図の反抗力曲線の二つの高い山A (6.2 kg-wt) とB (4.3 kg-wt) がそれらに相当するものと思われる。そうだとすれば，これらの山の始まりの点をa, bとすると，a, bは圧縮部分がJ15, J7′に達して，それらの層の破壊が始まる時刻になつている筈である。これらの時刻での錘の下面の位置は，位置曲線（図の上部の左上から右下に向うなめらかな実線）によつて，夫々雪面下2.1，4.4 cmと与えられる。又J15層の上面は雪面下4.4 cm, J7′は8.8 cmである。それで，これらの層に圧縮部分の下端が達した時の圧縮部分の厚さは，$4.4 - 2.1 = 2.3$ cm, $8.8 - 4.4 = 4.4$ cmとなる筈であるが，これらの厚さは，夫々その時の錘の沈みにほぼ等しい。一方，一般的に，圧縮部分の厚さは，圧縮部の下端が丈夫な層に近ずいた時には，ほぼ錘の沈みに等しくなることが知られてい

る。従つて，先にA, Bの山を夫々J15及びJ7′の層の破壊のために現われたと推定したことは正しかつたとしてよいであろう。

このことは，次の方法で更にはつきり確められた。即ち，錘が沈むにつれ，破壊も上の層から下の層へと逐次進んで行くのであるから，沈みつつある錘を途中で止めれば，破壊も途中で止まる。従つて，ある特定な層を破壊が通過した場合の反抗力曲線と，その層の手前で破壊が止められるように錘の落下を止めた場合の反抗力曲線とを比べて，反抗力曲線のどの部分がその層の破壊で生じたものかを確めることが出来る。そこで次の実験を行なつた。即ち，予め錘の上部に紐の一端を結び，その紐をゆるめて，他端をある固定した場所に結ぶ。そして錘が丁度雪の中に4 cm沈んだ所で，紐が伸びきつて錘の落下が止まるようにした。併し，錘の慣性のため，伸びた紐は切れて，錘は5 cm沈んで止まつた。この実験を第IX図に示す。第VIII図は，紐をつけないで，同一の条件の下に行なつた実験の結果である。第IX図のオツシログラムの垂直の点線B′は，錘が4 cm沈んだ所を示してある。位置曲線のB′の所から，右下の方に出ている破線は，第VIII図と同じもので，紐がなかつたら，錘が進んだであろう位置を示している。

第IX図の積雪断面図から，破壊がJ19, J15, J13と進み，丁度J13とJ7′の境で終つていることが解る。一方，第VIII図の積雪断面図では，破壊はJ7′, J7層を貫いてJ7層とJ5層との境にまで達している。従つて，第VIII図と第IX図の両反抗力曲線の比較から，反抗力曲線のどの部分が，J19, J15, J13の破壊で，どの部分がJ7′, J7の破壊であるかを知ることが出来る筈である。実際，第IX図の反抗力曲線のYaA a′B′の部分は，第VIII図の反抗力曲線のYaA a′bの部分によく似ている。従つて，これが，破壊がJ13層を貫いて，圧縮部分の下端がJ7′層の上に達するまでの反抗力を示すと考えてよいであろう。第IX図の反抗力曲線では，B′からCまで曲線は急に下つているが，これは，紐が直線になつて，のびきるまで錘が吊された形になつている間に相当し，又Cから再び上つているのは，紐を切るために現われた抵抗を表わすものと考えられる。CDEの部分が曲線の谷になつているのに対し，第VIII図のこれに相当する所では，逆にBの山 (4.3 kg-wt) が現われている。従つて，第VIII図のb以後は，J7′, J7の破壊で生じたものであり，高い山Bは丈夫なJ7′層の破壊のため生じたものであることに，ほぼ間違いはない。第一の高い山Aは，先に述べたように，丈夫なJ15の破壊で生じたものである。

錘を紐で吊した第IX図の場合の圧縮部分は，J19, J15, J13の三層が圧縮されたものであるが，その厚さは3.6 cmであるのに対し，錘に紐をつけなかつた第VIII図の場合には，圧縮部分のうち，J19, J15, J13層で出来た部分の厚さは3.4 cmで，ほぼ等しい。所で，第VIII図の場合，先に説明したように，圧縮部分の下端がJ7′層に達した時をb点とし，この時の錘の下端の位置を位置曲線から求めると，b点に於ての圧縮部分の厚さが得られるが，それは4.4 cmとなる。従つて，圧縮部分の下端が丈夫なJ7′層に達してから，その層が破壊される迄に，

圧縮部分は，厚さ 4.4 cm から 3.4 cm まで，更に 1 cm だけ圧縮されなければならないわけである。b 点から B 点迄の反抗力曲線の上昇は比較的なだらかであるが，これは，圧縮層が更に圧縮される時に現われた反抗力を示すものと考えられる。そして B 点に達する少し前に，J 7′ 層は破壊されたのであろう。第 IX 図の場合は，J 7′ 層は破壊されなかつたが，紐が切れた後も，かなり長い時間 DE なる反抗力が現われている。これも，圧縮部分を更に圧縮するための反抗力と解される。ただ，この場合は，紐が切れた時に，錘の運動エネルギーが殆んど失われたため，第 VIII 図の場合に比べて，圧縮力が弱くなり，反抗力が小さくなると共に，圧縮に要する時間も長くなつたものと思われる。

以上述べたような方法によつて，層構造と反抗力曲線との関聯がつけられる場合は，かなり多い。第 VIII 図についても，以上の他，反抗力曲線の Y～a 部分は J 19 の，a′～b 部分は J 13 の，B～Z 部分は J 7 の破壊に対応させられる。尚他の例についても，反抗力曲線と各層の破壊との対応がつけられるものは，各図の説明に附記しておいた。

VI. 一つの層の破壊の間に起る反抗力の激しい変動について

強さの違う層の破壊で，反抗力が違うことは当然考えられることで，前節では，そのために現われる反抗力曲線の変動について述べたわけである。併し，強さが一様な一つの層の中で破壊が行われている間にも，反抗力が激しく変動することがある。即ち，反抗力曲線のうち，その層の破壊に対応する部分に，起伏がひどく，数箇の山が連つていることがある。例えば，第 I 図の J 7 層の破壊の前半，第 IV, V, VI 図の J15 層の破壊 (Y～P 間) がそれである。これらの引続く山の間隔はせまく，0.004～0.008 sec のものが多い。この間隔は力の測定系の固有週期に近い値なので，反抗力曲線がそのまま雪の反抗力を表わしてはいない。併し，これらの反抗力の起伏はかなり長い間続いているので，これを，力の測定系の単なる減衰固有振動とみなすことは出来ない。固有振動の減衰は非常に速いのである。それで，これに関しては次のような解釈をした。

第 5 図 (A) のように，反抗力がとびとびに，測定系の固有週期に比べて，非常に短い時間継続する力として，1, 2, 3 のように現われる場合を考え，これらの力の力積を夫々 I_1, I_2, I_3 とする。測定系のカバー (第 1 図参照) の変位を x とすると，この x に比例する量が反抗力曲線に現われるわけである。今，$x=0$ の状態に於て I なる力積の衝撃力がカバーに加えられたとすると，カバーは $v=I/m$ (m はカバーの質量) なる速度で運動を始めるが，この運動は減衰振動であつて，変位 x は

$$x=\frac{v}{n}e^{-bt}\sin nt \qquad (1)$$

で表わされる。n はカバーの固有振動率，b は振幅の減衰常数である。従つて，第 5 図 (A) のように衝撃力が次々と作用すれば，衝撃力の各々は，夫々同図 (B) に 1, 2, 3 と印した点線で示

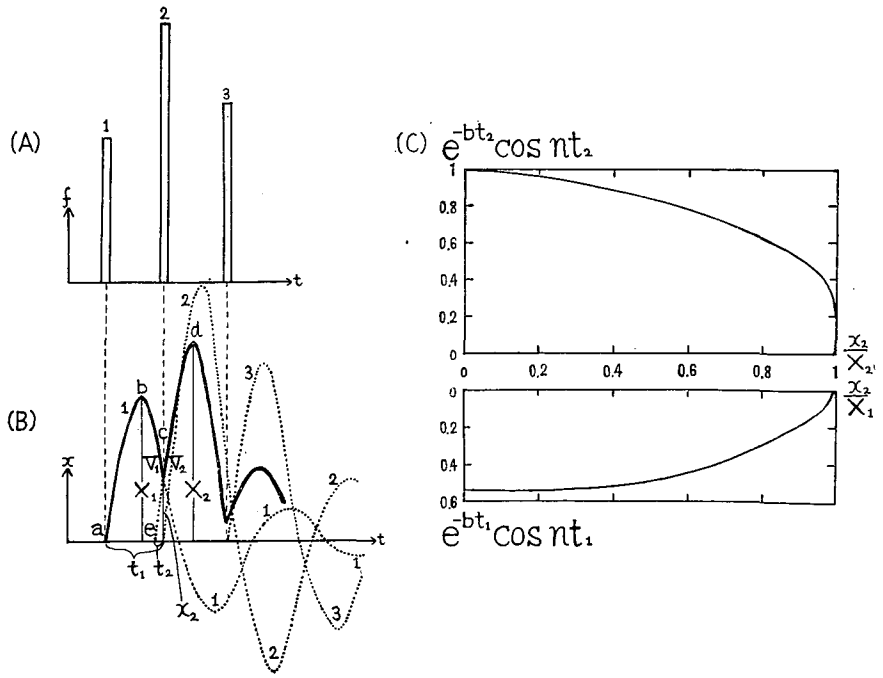
されるような(1)式の形の減衰振動をカバーに起させる。そして，これらの減衰振動を合成したもの，即ち太い実線で表わしたような変位 x が起ることになる。一方，第IV, V, VI図のJ 15 層の破壊 (Y～P 間) の反抗力曲線は，この太い実線と形がよく似ている。従つて，この反抗力曲線はかかる機構によつて生じたものと考えてよいであろう。

つぎに，第5図(B)の太い実線で表わされる x が観測されたとして，この x の曲線から衝撃力 1, 2, 3 の力積 I_1, I_2, I_3 を求める方法を考えてみよう。例として I_2 を求めることを考える。曲線は a 点から b, c, d 点と変化しているが，x が極小値をとる c 点で速度 $\dot{x}$ が不連続に変化している。そして，この不連続変化の直前の $\dot{x}$ の値を V_1，直後の値を V_2 とすれば，求めようとする力積 I_2 が

$$I_2 = m(V_2 - V_1) \qquad (2)$$

で与えられることは明らかなことである。m はカバーの質量である。従つて，曲線の形から $V_2 - V_1$ の値を定めることが出来ればよいことになる。

b 点，d 点での x の極大値を夫々 X_1, X_2 とし，c 点での x の極小値を x_2 とする。カバーは，衝撃力が働いていない時は常に自由な減衰振動をしているのであるから，c 点から d 点に到る



第 5 図 (A) 雪の反抗力 f.
(B) カバーの変位 x (実線). 点線 1 は 1 の力，点線 2 は 2 の力，点線 3 は 3 の力によるもの.
(C) $e^{-bt_1}\cos nt_1$ と $\frac{x_2}{X_1}$ 及ぶ $e^{-bt_2}\cos nt_2$ と $\frac{x_2}{X_2}$ との関係.

間もやはり自由な減衰振動である。それでcd間の曲線を左下の方に延長して，それが時間軸と交つた点をeとすると，cd間の曲線は，e点を出発点とする一つの減衰自由振動と考えることが出来る。ここで，a点からc点までの時間をt_1，e点からc点までの時間をt_2としよう。そうすると，減衰振動の式として(1)式の形式を使つて，簡単な計算を施すと，

$$V_2 - V_1 = n_0 e^{\frac{\pi}{2n}b}\left[X_2 e^{-bt_2}\cos nt_2 - X_1 e^{-bt_1}\cos nt_1\right] \tag{3}$$

$$\frac{x_2}{X_1} = \frac{n_0}{n} e^{\frac{\pi}{2n}b} e^{-bt_1}\sin nt_1,\quad \frac{x_2}{X_2} = \frac{n_0}{n} e^{\frac{\pi}{2n}b} e^{-bt_2}\sin nt_2 \tag{4}$$

なる関係が得られる。ここにn_0は振動系に減衰がないとした時の，即ち$b=0$の場合の，振動系の振動率である。(3)式の$e^{-bt_2}\cos nt_2$，$e^{-bt_1}\cos nt_1$は(4)式を媒介として，x_2/X_1，x_2/X_1の値から計算によつて求めることが出来る。かくして，曲線の一つの極小点と，それをはさむ前後の極大点とに於けるxの値から，極小点に於て作用した衝撃力の力積が求められることになつた。

この実験の場合，振動系の常数は$n \approx n_0 = 1.2\times10^3\,\mathrm{sec}^{-1}$，$b = 2.5\times10^2\,\mathrm{sec}^{-1}$であつた。これらの値を使つて，(4)式により計算すると，x_2/X_1，x_2/X_2と$e^{-bt_1}\cos nt_1$，$e^{-bt_2}\cos nt_2$との関係が第5図(c)のように得られる。この図によつて，(3)式の値が直ちに求められる。

実験で求められる反抗力曲線の高さは，力の単位を使つて表示されているが，いうまでもなく，その高さはカバーの変位xに比例している。従つて，反抗力曲線自身に上記の取扱いをした後で，適当な常数を乗ずれば，衝撃力の力積Iが計算される。第1表はこのようにして第IV, V, VI図について求めた力積の値で，これらの値は，夫々の図に同じスケールで，縦の破線で表わしてある。

第 1 表

第 IV 図			第 V 図			第 VI 図		
衝撃力 No.	衝撃力が現われた時の錘の下面の位置 (雪面下) h	衝撃力の力積 I	衝撃力 No.	衝撃力が現われた時の錘の下面の位置 (雪面下) h	衝撃力の力積 I	衝撃力 No.	衝撃力が現われた時の錘の下面の位置 (雪面下) h	衝撃力の力積 I
	cm	gr-wt·sec		cm	gr-wt·sec		cm	gr-wt·sec
1	0.3	5.1	1	0.6	4.8	1	0.4	6.4
2	0.5	5.4	2	1.2	7.7	2	1.0	11.4
3	0.8	4.2	3	1.8	6.5	3	1.7	7.9
4	1.2	6.4	4	2.2	3.1			
5	1.5	2.6	5	2.5	4.6			

第IV, V, VI図は，同じ組成の雪塊に，異なる高さから錘を落したもので，この順に，その高さは2cmづつ増している。高い所から錘を落す程力積が大きくなつているのが見られる。又，三つの図の場合，力積は互に大体対応して現われており，一つの層の中での破壊も出たら

めなものでなく，かなり規則的で，内部構造に関聯のあることを示している。

以上の衝撃力の力積の計算は，衝撃力の作用する時間が，測定系の振動週期に比べて非常に短いという条件の下に行なつたわけである。この条件が実際に成立していることを，一つの特別な場合についてではあるが，落下する錘が雪の表面に接触した瞬間に現われる衝撃力に関して，証明することが出来る。円形の底面をもつた質量 M の錘を雪面に静かにのせて，錘の下の雪が少し沈み，錘が雪の弾性によつて支えられている時には，その沈み y は

$$y = Mg\,(1-\nu^2)\,/2RE \qquad (5)$$

で与えられる。R は錘の底面の半径，E, ν は夫々雪のヤング率，ポアソン比である。M を大きくして行くと，Mg がある値 W となつた時に，雪は破壊する。即ち，W は支持力である。この時の y の値 y_W は，(5) 式で Mg の代りに W を代入すれば得られるが，今，実際の一つの例として，$W = 4$ kg-wt, $R = 5$ cm, $E = 10^7$ dyne/cm^2 [7], $\nu = 0.3$ として計算すると，y_W の値として 3.6×10^{-2} cm が得られる。落下する錘が雪面に接触すると，先ず雪は弾性的に沈むわけであるが，その沈み y が y_W に達する迄は，(5) 式で与えられる Mg なる反抗力を示すと考えてよいであろう。そして，y が y_W に達したら，雪は破壊すると考える。すると，この時の衝撃力の継続時間は，y が y_W になる迄の時間と，雪が破壊されるのに要する時間との和となるが，この時間は大きさの程度に於ては，y が y_W になる迄の時間に等しいと考えてよいであろう。雪面上 1 cm の高さから錘を落した場合でも，それが雪面に達する時の速度 V は約 50 cm/sec になる。ここで行なつた実験の場合のように，錘の質量が大きければ，雪面でうける衝撃によつても速度は余り変らない。それ故，y が y_W になる迄の時間 τ は，y_W/V で与えられるが，ここで，$y_W = 3.6\times10^{-2}$ cm, $V = 50$ cm/sec とすれば $\tau = 0.7\times10^{-3}$ sec となる。かくして，衝撃力の継続時間は，測定系の振動週期の約 5 分の 1 で，先に述べた条件が割合よく満足されていることが解る。

VII. 衝撃で凹んだ雪が丈夫になること

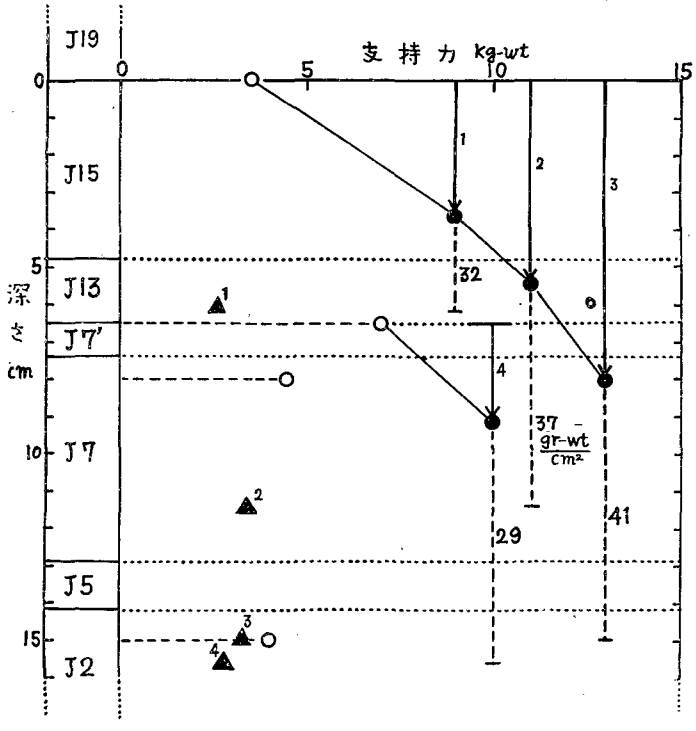
積雪が落下する錘の衝撃をうけて凹むと，凹んだ所の雪の静的支持力が増すことは，よく知られている。凹みの深さや，凹みの底面の形と支持力との関係については，色々研究がされている[5),6),8)]。

直径 10 cm，重さ 2 kg の錘を落した場合の，第 IV, V, VI 図の凹んだ雪について，凹んだ後の支持力を調べた所，夫々 9, 11, 13 kg-wt であつた。(衝撃を加えてオツシログラムを撮つた雪塊については，その断面を切つて色水検査をしたため，支持力が測れないので，別に同じ雪塊を作つて，それに同じ衝撃を加え，その後の支持力を測定した。) 又，薄くて丈夫な J 7′ 層から上の部分を取去つて，J 7′ 層を最上層とする雪塊についても，同様な実験を行なつた。雪面上 2 cm の高さから錘を落した所，2.8 cm 沈み，凹んだ所の支持力としては 10 kg-wt が得られた。この日の各層の厚さ，支持力及び実験情況を第 6 図に示す。図の左端は雪塊の断面

構造で，白円印は各雪層の静的支持力を表わす。ある層の支持力は，前にも述べた通り，その層より上にある層を取除いた後の表面に荷重し，その荷重を除々に増して，遂に雪が沈む時の荷重の大きさによつて定めた。黒円は，落下した錘の雪の中に沈んだ深さと，沈んだ後の支持力とを表わしている。又，黒円の下に続く鉛直の破線は，錘の落下によつて破壊の及んだ部分を示す。破線の傍の数字は，後に述べる抗剪力の値である。中央からやや左上の直線で結ばれた三つの黒円は第IV, V, VI図の場合で，他の黒円はJ7′層を最上層とする雪塊についてのものである。

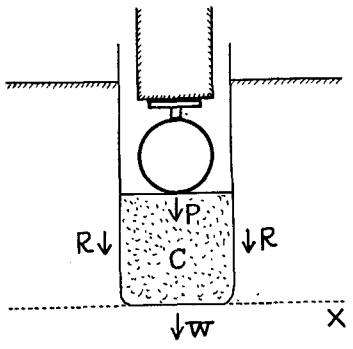
第IV, V, VI図の反抗力曲線をみると，錘が雪の中で停止する直前の反抗力は，錘自身の重さ2 kgより大きい3 kg-wt前後の値を示している。そして，その後の支持力P，即ち，錘の落下で沈んだ後，更に沈ませるに要する力は9 kg-wt以上に及ぶ。

つぎに，この凹んだ雪の支持力Pについて，簡単な考察をしてみる。衝撃後の積雪断面は，模型的に書けば，第7図で表わされるであろう。錘の下には圧縮部分Cが出来て，Xの深さに迄達している。この雪を更に凹ますためには，圧縮部分Cの下の層Xを新しく破壊するに要する力Wと，圧縮部分Cがその側面の雪から抜けて行くための抗剪抵抗Rとに，即ち



第6図 1月23日，黒丸は衝撃で凹んだ雪の深さと支持力との関係．白丸は各層の支持力．破線は破壊が及んでいる範囲．破線の傍の数値 (gr-wt/cm²) は抗剪力R．1, 2, 3は夫々第IV, V, VI図の場合で，4はJ7′層から上を取除いた雪塊についての場合である。三角印は夫々の実験における最終反抗力。

$P = W + R$ の力に打勝つことが必要である。 W はX層の支持力に相当するもので，これは既に測定してあるから，$R = P - W$ によつて抗剪抵抗 R を求めることが出来る。この R を圧縮部分 C の側面積で割つて，単位面積当りの抗剪力とした値が，第6図の夫々の圧縮部分を示す破線の傍に記してある。抗剪抵抗 R の値は圧縮部分の側面の夫々の層の抗剪力の値にほぼ等しい。第6図の三角形の印は落下する錘が止まる直前に於いてうける最終反抗力の値 (kg-wt) で，反抗力曲線から求めたものである。この印は圧縮部分を示す鉛直の破線の下端と同じ深さの所に書き入れてあるが，最終反抗力の値は，常に，圧縮部分の下端が属する層の支持力の値 (白円印で示す) よりは小さい。最終反抗力が現われつつある時には，圧縮部分は未だ運動中であるが，もしもこの時抗剪抵抗 R が強く働いているとすれば，最終反抗力は層の支持力よりも大きくなり得る筈である。従つて，ここにあげた事実は，圧縮部分が運動している間は，抗剪反抗力は小さく，最終反抗力は圧縮部分の下面に於ける圧力に等しいと考えて説明するのが自然であろう。



第7図
衝撃で凹んだ雪の断面の模型図

以上のことから，錘が沈みつつある過程では，錘の下に圧縮部分が発達しつつ動いているが，その時の R は小さい。併し，一度止つてしまうと，再び動き出させるのには，丁度摩擦現象と同じように，R が大きくなり，それ迄よりは大きな力が要るようになると解釈される。

圧縮部分が一度止つた後，再びそれを動かす時には，大きな抗剪力 R に打勝たなければならないとすれば，一度錘を落した穴に，再び錘を落せば，最初に大きな反抗力が現われなければならない。事実，その通りになるのであつて，その例を第III図に示した。第III図は初め第II図と同じ衝撃を与えて (即ちJ13の層について，雪面上2cmの高さから錘を落して)，8.5cm凹んだ雪塊に (第II図では8cm凹む)，更にその凹んだ面の上2cmの高さから錘を落したものである。反抗力曲線には最初著しく大きな独立した抵抗が現われている。第**VI**節で述べた方法により，この山の原因となつた力積を計算すると，14 gr-wt·secとなる。錘が雪からうけた反抗力の全力積は，錘に働く重力と錘が落下し始めてから止まる迄の時間との積に等しいが，それは258 gr-wt·secである。従つて，最初の山の力積は全力積の1/18にすぎない。尚，凹んだ所の静支持力は14 kg-wtであつた。(この支持力は第III図の実験を行う雪塊と組成は同じであるが，別の雪塊について測定した。) 反抗力曲線の最初の山の原因となつた反抗力は少なくとも，この支持力より大きい値を持つていた筈である。そして，この反抗力の力積は上に述べたように14 gr-wt·secである。従つて，その反抗力の継続時間は，0.001 sec或はそれより短いものであつたに違いない。

VIII. 抗剪力の衝撃試験

前の節で，錘の下に出来た圧縮部分の側面に現われる抗剪抵抗或は抗剪力 R を問題にしたが，衝撃に対するこの抗剪抵抗を特に研究する目的で，次のような実験を行なつた。木の板で，断面が 10 cm×5 cm の矩形の細長い筒を作り，その中央部分の長さ 10 cm の部分が取外せるようにしておく。この取外し部分を簡単のためにA部分ということにする。筒に丁度はまるように積雪を切つて，A部分を取付けたままの筒の中に差入れ，これを第 XI, XII 図の左端に書いてあるように，台Bの上に横たえる。そして，錘をA部分に落すと，雪はA部分の左右の端の所で断ち切られ，A部分は下に落ちる。この時錘に及ぼされる反抗力は，明かに雪が断ち切られる時の抗剪抵抗 R である。

第 XI, XII 図の二つの実験例は，密度 0.3 の同じ雪についてのものであるが，錘の自由落下の距離は，前者では 4 cm，後者では 2 cm である。従つて，衝撃速度は第 XI 図の方が速いが，それにつれて最初の山も第 XI 図の方が高い。この最初の衝撃で現われる力積を，第 **VI** 節の方法によつて計算すると，第 XI 図では 14 gr-wt·sec，第 XII 図では 11 gr-wt·sec となる。A部分がすつかり切落されて雪からの反抗力が 0 になる迄の全力積は，第 XI 図で 110 gr-wt·sec，第 XII 図で 109 gr-wt·sec で，両者殆んど同じである。又，この雪の静的な抗剪力は 8 kg-wt であつたが，この力で雪が断ち切られるのには，大体 2 乃至 3 秒かかつた。従つて，この時の力積は 8～12 kg-wt·sec で，衝撃の場合の力積に比べると，著しく大きい。

今迄この論文で取扱つて来た雪は，すべて 0℃ 以下の温度にあつて含水率 0 の雪であつたが，抗剪力の試験は，含水率の 0 でない雪についても実験を行なつた。その結果を第 2 表に示す。

第 2 表

月 日	雪 質	密度	雪温	含水率	落下する錘による衝撃試験				
					錘の質量	錘の自由落下の高さ	最初の衝撃力の力積	全 力 積	静的抗剪力 (100cm² についての値)
			℃		kg	cm	gr-wt·sec	gr-wt·sec	kg-wt
Mar. 13	しまり雪	0.25	0		2	4	8.4	120	7
Mar. 16	しまり雪	0.28	0	0*	4	4	16	166	16
Mar. 19	ざらめ雪	0.35	0	1.2 %	2	4	12	49	5
Mar. 20	ざらめ雪	0.33	0	1.6 %	2	1	6.5	43	5

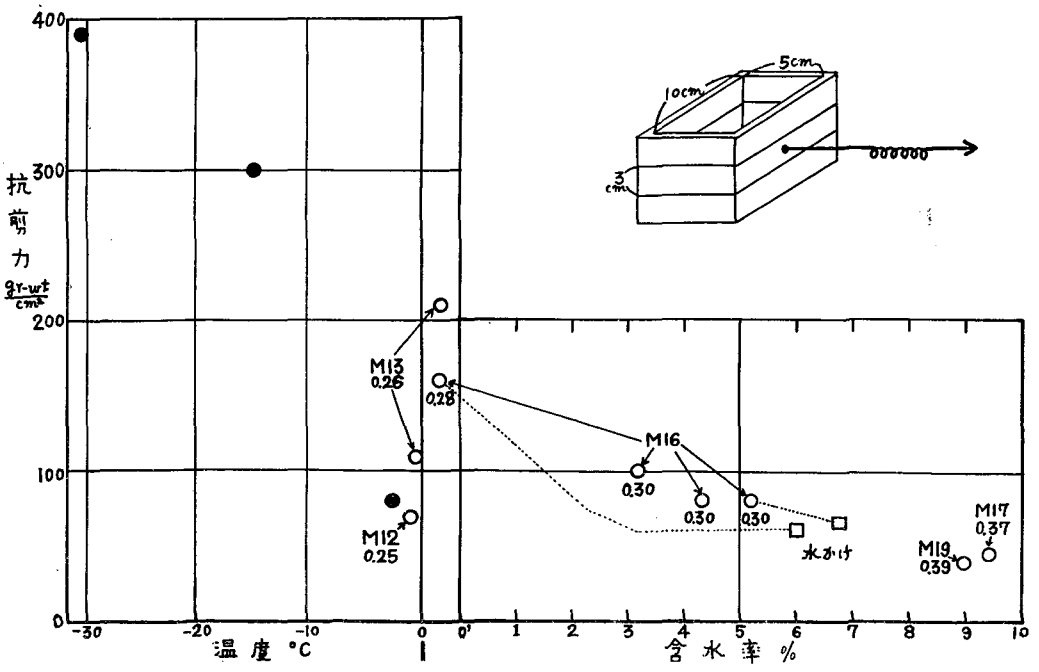
* 遠心分離器で水が分離されなかつたが，多少の水は含んでいるらしい。

雪の含水率は，吉田が考案した遠心分離器[9]で測定した。静的抗剪力の測定は，高さ 10 cm，断面 5 cm × 10 cm で，引抜き部分の厚さ 3 cm の三段箱に雪を入れ，水平にスプリング秤で引抜く方法で行なつた（第 8 図右上の図）。第 2 表から解るように，衝撃で切落す時に要する力積の大きいものは，静的抗剪力（単に抗剪力という）も大きい。

第2表の値にも，雪の含水率が大きい程，抗剪力が小さくなる傾向が認められるが，このことは，早くから平田徳太郎等によつて研究されていた[10]。それを確める意味で，筆者も一連の測定を行なつたので，その結果を次に報告する。

3月1日に積つた積雪層M1は，3月19日には，しまり雪を経て湿つたざらめ雪に変化したので，その途中で，色々な値の含水率の雪の試料をこの層から取ることが出来た。これらの試料について抗剪力と共に，密度，温度，含水率を測定した結果を第8図に示してある。図の測定点につけてあるM16, 0.30等の記号は，測定が3月16日に行なわれ，その時の雪の密度が0.30であつたという意味である。

温度0°C以上の雪については，含水率に対して抗剪力を取つてある。含水率は，上記の遠心分離器で分離された水量によつて決めた値である。併し，遠心分離器では，完全には水は分離されない[11]ので，含水率の極めて小さなものは，たとえ水を含んでいても，この方法によれば含水率0となる。図の0と0′との間の測定点は，含水率は0と得られたけれども，少し水を含んでいると思われる雪についてのものである。又図中水かけと書いてあるのは，点線で結んである積雪試料の上面に水をピペットで一様にまき，1日0°Cの箱の中に保存して，一様に水が雪の中に分散されるようにしたものである。図の左半分は，雪層M1がまだしまり雪であつた時に，それから雪塊を切出し，−20°〜−25°Cの低温室に約1箇月半保存しておいた後，



第8図 積雪抗剪力と温度，含水率との関係。0と0′の間は遠心分離器で水が分離されなかつたが，多少の水を含んでいるらしい。右上の図は抗剪力測定装置略図。各点の記号例えばM13, 0.26は3月13日に測定し，密度が0.26の意味である。

— 30.5°C, — 15°C, — 3°C で抗剪力を測定した結果を示している。雪の密度は 0.28～0.30 であつた。

雪の温度は，もとより，0°C 以上にはなり得ないが，0°C の雪でも含水率の大きいものは，小さいものより熱をよけいに持つているという意味で，温度が高いと考えられないこともあるまい。仮にこれを含水温度ということにすると，第8図は，雪の抗剪力が温度の上昇と共に 0°C 以上にもわたつて，ほぼ連続的に減つて行くことを示している。併し，詳しくみると，0°C の所で，温度上昇と共に，一度下つた抗剪力が，雪に水が含まれ始めると，急に増加するのがみられる。

抗剪力には，積雪粒間のつながりである氷橋の破壊と，粒間の摩擦とがきくわけであるが，雪が僅かに湿つている時は，雪粒表面を被う水の膜の表面張力のため，摩擦部分の圧力が増して摩擦が大きくなるために，抗剪力の増大が起るものと考えられる。含水率が大きくなると，水の自由表面の面積が減少して，表面張力の効果が小さくなると同時に，粒間の摩擦部分に水が入つて，潤滑剤として作用し，抗剪力を減少させるのであろう。

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なわれたものである。

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***, 26.
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***, 13.
3) 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.
4) 小島賢治 1956 積雪層の粘性圧縮 II. 本誌, 物理篇, ***15***, 117.
5) 斎藤錬一 1947 積雪の荷重物体支持について (1), (2), (3) 雪氷, ***9***, 6, 40, 74.
6) 黒田正夫 1949 積雪の力学的性質. 雪氷十年 (日本雪氷協会編), 88.
7) Zyungo YOSIDA, and Colleagues 1956 Physical Studies on Deposited Snow. II. Mechanical Properties. (1). Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No. 9, 15.
8) 藤岡敏夫 1950 積雪がものを支える力. 低温科学, ***3***, 109.
9) 吉田順五 1955 遠心分離器による積雪含水量の測定について. 低温科学, 物理篇, ***14***, 55.
10) 平田徳太郎・吉田重助・勝谷 稔 1940 積雪の含水量について. 雪氷論文集 (日本雪氷協会編), 77.
11) 大浦浩文・木下誠一 1954 手廻し遠心分離器による積雪含水率の測定. 低温科学, 物理篇, ***12***, 61.

Résumé

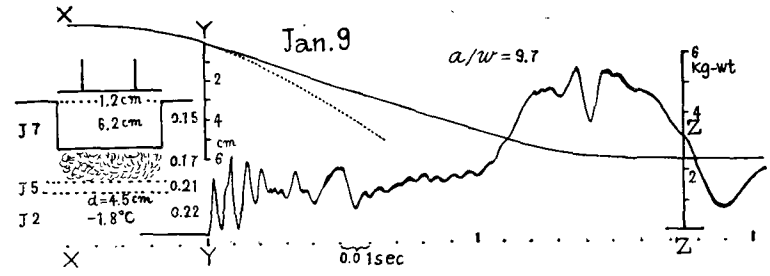
The intricately changing resisting force which a body met while it was falling into snow was registered by an electromagnetic oscillograph. The resisting force showed large slow changes on which rapid changes were superimposed. The large changes in the resisting force seem to arise from the difference in the strength of each of the snow layers composing the snow which are broken down one after another as the falling body sinks into the snow. For the purpose of studying the relation between the large changes in the resisting force and the layer-construction of the snow body, experiments of the falling body were made on the snow on which the load supporting strength W had previously been measured for each of its layers. It was found that each of the layers acted on the falling body with resisting force of almost the same magnitude as its own load supporting strength W.

The rapid changes superimposed on the large slow ones seem to have their rise in the intermittent break-downs taking place in each of the snow layers. One snow layer is of uniform structure, but it does not give way at one time; it undergoes several intermittent break-downs. The impulses corersponding to each break-down were calculated from the registered curve of the resisting force; they are shown by vertical broken lines in Figs. IV, V and VI.

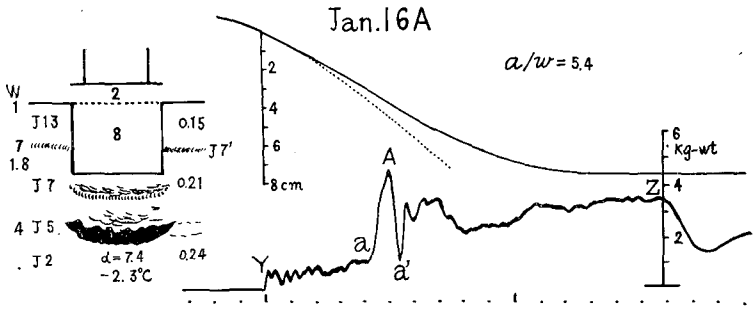
The bottom of the hole made in the snow by the fallen body showed a large load supporting strength. It was much larger than the load supporting strength W of the snow layer down to which the region of compressed snow had developed. Such a large increase of load supporting strength was explained by the existence of a shearing force acting on the side surface of the region of the compressed snow.

Shearing strength was measured on many snow samples of different temperatures and of different water contents (Fig. 8). At 0°C it decreased with increasing water content; below 0°C it increased with decreasing temperature.

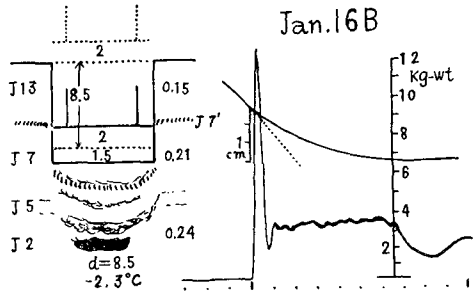
When the mass of snow which is compressed by the falling body and the energy absorbed by the snow are denoted by a and w respectively, the ratio a/w can be considered as a measure of the softness of the snow. The values of this ratio have been found by the author to be in the range 0.5～2 for ordinary settled snow. But the snow of the 1955～'56 winter, having been subjected to an intense sublimation metamorphosis, was very fragile and showed large values of the ratio lying within the range 5～10.



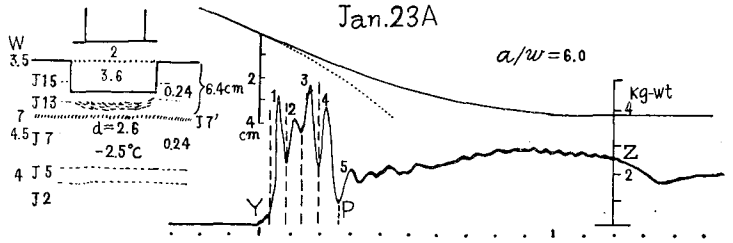
第 I 図 1月9日 (錘の下面は直径 14 cm). 積雪断面図，錘の位置曲線及び雪の反抗力曲線。錘は X で落下を始め，Y で雪面に達し，Z で止まる。d は圧縮部分の厚さ，錘の重さは 2 kg (以下第 VII 図まで同じ). 各記号は本文第 III 節参照。位置曲線の途中から出ている点線は，錘が自由落下を続けた場合のである。



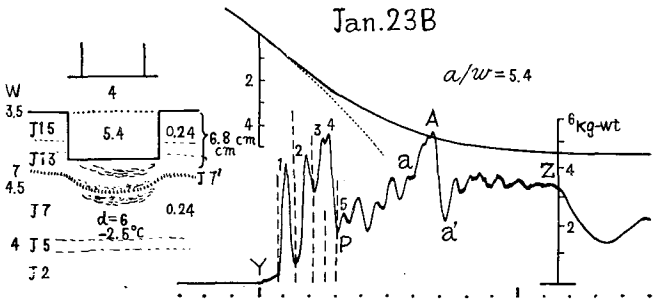
第 II 図 1月16日A. (錘の下面は直径 10 cm). Y～a は J 13, a～A～a′ は J 7′ a′～Z は J 7, J 5, J 2 の破壊に対応する。積雪断面図の左側の W は各層の支持力 (錘の下面と同じ円板に対する値，kg-wt)。



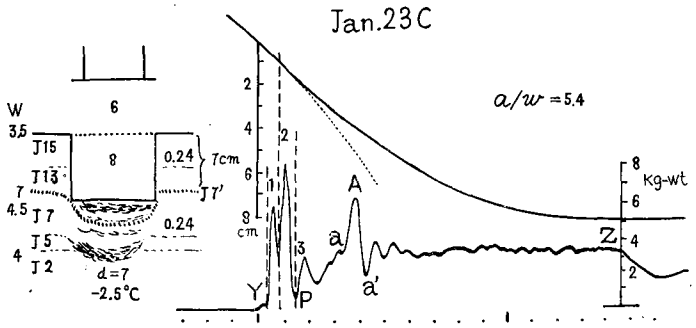
第 III 図 1月16日B. 第 II 図と同じ衝撃で凹んだ雪に，再び衝撃を与える。本文第 VII 節参照。



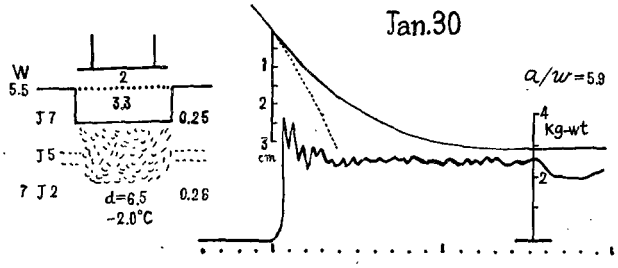
第 IV 図　1 月 23 日 A (錘の下面は直径 10 cm). Y～P は J 15, P～Z は J 13 の破壊に対応する。 1, 2, 3, 4, 5 の夫々の山の始まりに書入れてある縦の破線の高さは夫々の山の原因である力の力積を表す。本文第 VI 節参照。



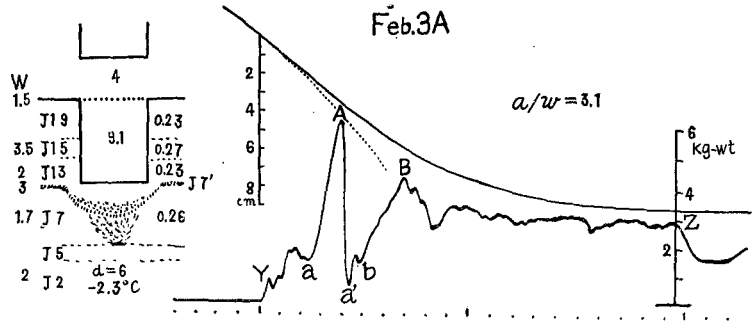
第 V 図　1 月 23 日 B (錘の下面は直径 10 cm). Y～P は J 15, P～a は J 13, a～A～a′ は J 7′, a′～Z は J 7 の破壊に対応する。破線の意味は第 IV 図と同じ。



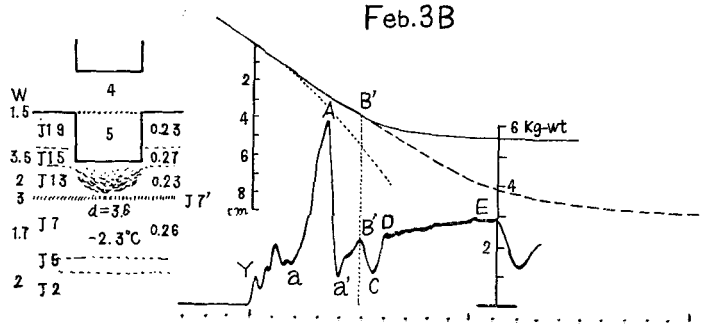
第 VI 図　1 月 23 日 C (錘の下面は直径 10 cm). Y～P は J 15, P～a は J 13, a～A～a′ は J 7′, a′～Z は J 7, J 5, J 2 の破壊に対応する。破線の意味は第 IV 図と同じ。



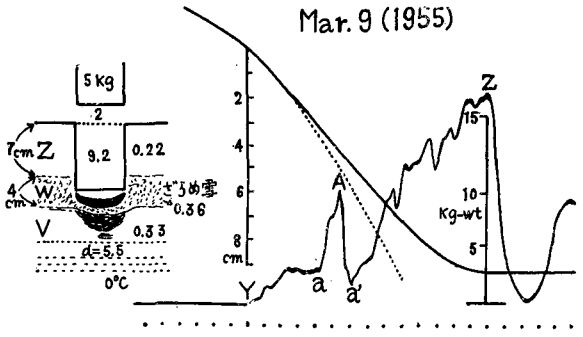
第VII図 1月30日 (錘の下面は直径 10 cm).



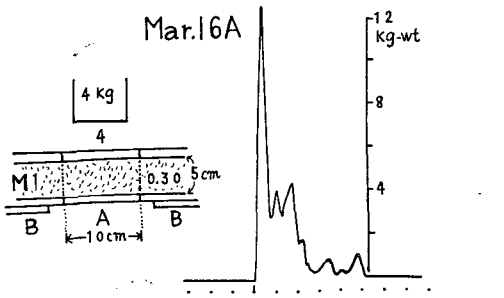
第VIII図 2月3日A (錘の下面は直径 7 cm). Y～a は J 19, a～A～a′ は J 15, a′～b は J 13, b～B は J 7′ B～Z は J 7 の破壊に対応する。この対応関係については本文第 V 節参照。



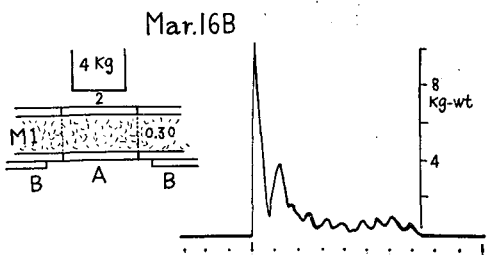
第IX図 2月3日B. 第VIII図と同じ衝撃を与えるが，錘が途中で止まるようにする。 B′ で紐の抵抗が働き，錘の速度が急に減る。 位置曲線の B′ から出ている破線は，第VIII図と同じように錘が落下する場合のである。Y～a は J 19 a～A～a′ は J 15, a′～B′ 及び D～E は J 13 の破壊に対応する。 本文第 V 節参照。



第 X 図 昨年度の3月9日(錘の下面は直径6.6 cm)。Y～a は Z, a～A～a′ は W a′～Z は V の破壊に対応する。圧縮部分のうち，ざらめ雪の層 W は，かなり側方に流動している。本文第 III 節参照。



第 XI 図 3月16日 A. 衝撃で A 部分を切落す。湿つた雪で含水率 5.2%. 本文第 VIII 節参照。



第 XII 図 3月16日 B. 第 XI 図と同じ実験。ただし，始めの錘の高さを減らす。