



Title	積雪における変形速度と変形形式との関係 II
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 17, 11-30
Issue Date	1958-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17941
Type	departmental bulletin paper
File Information	17_p11-30.pdf



積雪における変形速度と変形形式との関係 II*

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)

I. 緒 言

積雪は、外力を受けて変形するに当つて、粘弾性を示すということについては、既に若干の研究がなされている^{1),2)}。一般に、粘弾性物質の変形形式はその変形速度に関係するが、積雪についても、次の事が観察される。即ち、物体を雪の中に落す場合のように、速い変形を雪に与えようとする、変形は破壊によつて起るが、自然積雪の沈降のように緩慢な変形の場合には、積雪には破壊が起らない。このように、積雪の変形形式が変形速度と密接な関係にあることに着目して、筆者はその関係に関する研究を行つた^{3),4)}。積雪を 1~40 mm/min の範囲の定速度で圧縮する装置を作り、積雪の変形の有様と積雪が圧縮に際して示す反抗力 R について調べ、第 I 報³⁾として報告した。その主要な結果は次のようにまとめることが出来る。

(1) 積雪を圧縮する速度 v が或る限界速度 v^* より小さいときには、積雪は破壊せず連続的に圧縮される。これを塑性変形と呼ぶ。

(2) v が v^* より大きいときには、圧縮板が雪粒の大きさ程度進む毎に、破壊が起る。即ち、積雪は間歇的に破壊されながら圧縮される。これを破壊変形と呼ぶ。

(3) 限界速度 v^* は硬いしまり雪で 7~13 mm/min, 軟いしまり雪で 3~7 mm/min の範囲にある。

(4) 塑性変形のときの雪の反抗力 R は、始めは急にその後緩かに、連続的に増大して行く。

(5) 破壊変形のときの反抗力は、圧縮と共に増すが、或る値 R^* に達すると急に降下し、再び増大しては又降下するということを繰り返す。即ち、反抗力一時間曲線は、鋸歯状を示す。この反抗力の間歇的降下が 2) に述べた間歇的破壊に対応する。

(6) 破壊変形の場合、 v を小さくして行くと、反抗力一時間曲線の個々の鋸歯が、横に広がつて幅が広くなり、遂には反抗力の降下が観察されなくなる。即ち、破壊が起らなくなる。ここにおいて、破壊変形は塑性変形に移行する。

(7) 破壊変形のときの最大反抗力 R^* は、塑性変形のときの反抗力よりも小さい。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 438 号

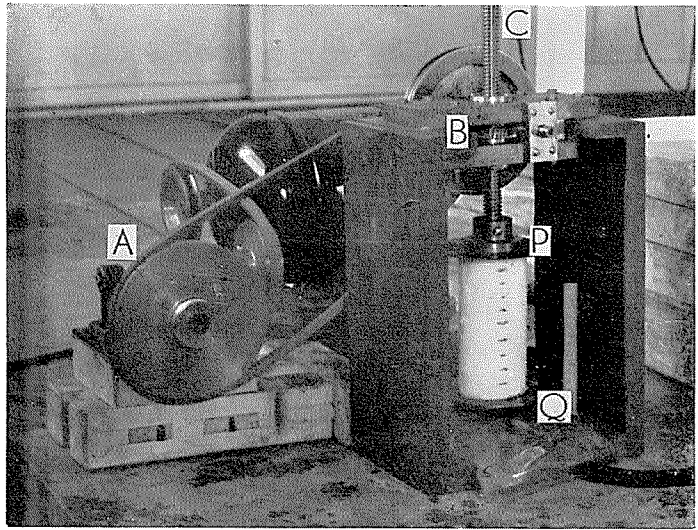
以上では、温度と変形形式との関係には、余り重きをおかなかつたが、その後、温度と圧縮速度とを広い範囲に変えて実験し、温度、圧縮速度、変形形式との間の関係を調べることが出来た。又、一度圧縮した積雪を再圧縮するときに現われる硬化現象や、破壊変形における破壊部分の移動等も観察した。これらの実験結果について以下に報告する。

II. 実験方法

実験装置は、前回の報告³⁾で述べたものに多少の改良を加えたもので、第1図がその写真である。表面に食紅の粉で目盛をかき入れた雪の円柱を、圧縮板 P で圧縮する。雪の円柱をのせている台 Q には、円柱が Q に及ぼす力、即ち雪の圧縮抵抗を測る装置がついている。

単相誘導型 200 V, 1/2 馬力のモーターは 2 段の減速装置 A, B を介して、圧縮板 P を下端につけた螺旋棒 C を徐々に下降させる。C の下降速度は 1~600 mm/min の間の任意の一定値に保つことが出来る。300 kg の圧縮抵抗に対しても、C の下降速度には殆んど変動が見られなかつた。

台 Q の下にとりつけた雪の反抗力の測定装置には、運動する 2 枚の燐青銅板のうちの一方の表と裏に夫々 2 枚ずつ、ストレンゲ

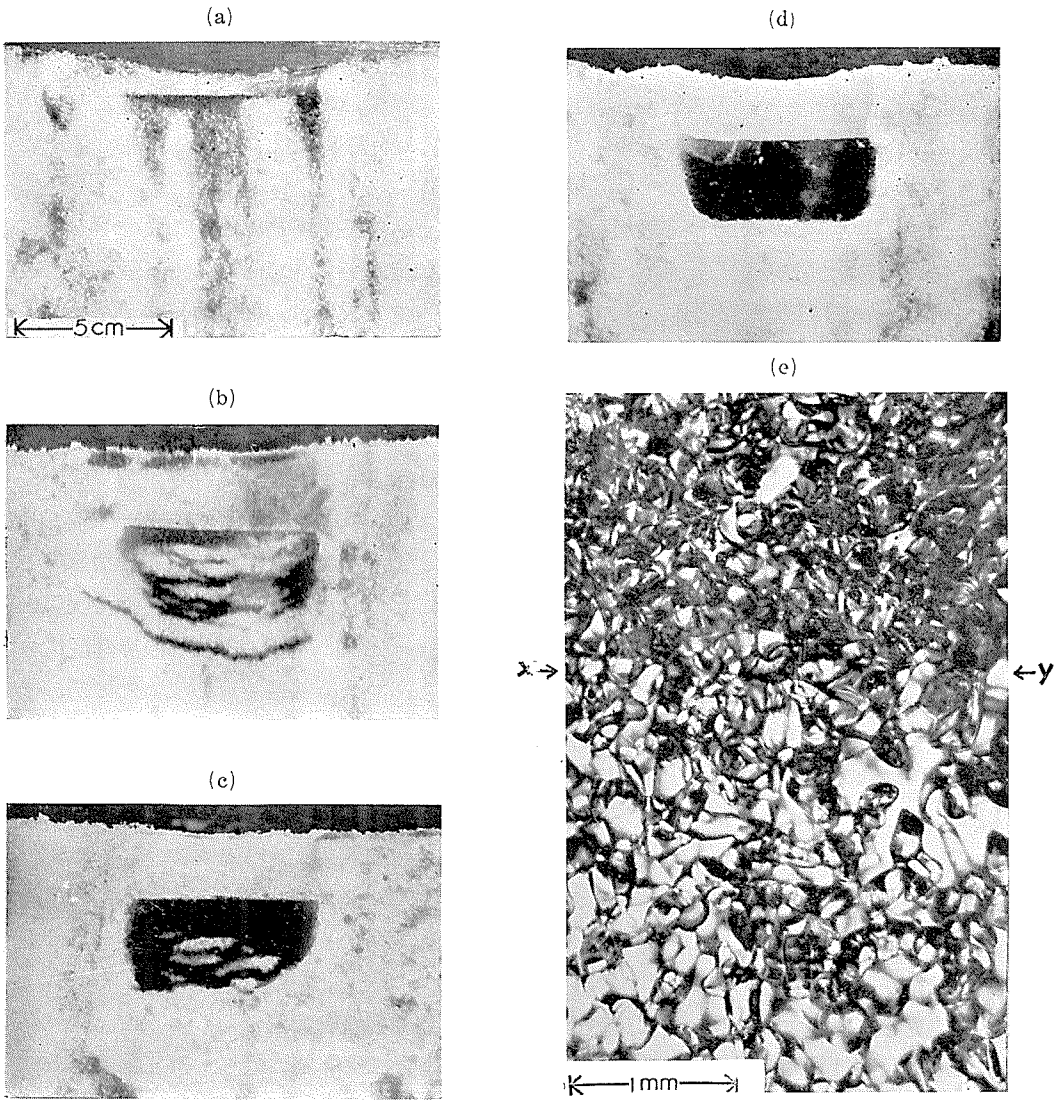


第1図 積雪を定速度で圧縮する装置

A, B は減速装置。P は圧縮板。Q は雪をのせる台で、その下に雪の反抗力の測定器がとりつけてある。

ージがはつてある。Q は燐青銅板の中心を貫く鉛直な鉄棒で支えられており、Q に雪の円柱の反抗力が働くと、燐青銅板が歪む。この歪みをストレンゲージ、増幅器によつて、電磁オシログラフ（振動子は H 型或いは A 型）又はマイクロレコーダーで記録した。

雪の試料としては、雪の円柱の他に大きな雪塊も用いた。台 Q の上に鉄板をおき、それに雪塊をのせて圧縮板 P を雪塊の中心にめりこませる。このようにして、雪塊の反抗力を記録した後、P がめりこんで出来た雪塊の穴の中心を通る面で雪塊を切断し、その断面にインキで着色した色水を霧吹きで吹きかけ、ガスの焰であぶつて、色水のしみこみ具合から雪の変形の様子を検討した。（以後、この装作を雪塊断面の色水検査ということにする。）



第 2 図 雪塊の圧縮断面 雪密度 $\rho = 0.23$ 雪温度 $T = -1.5^{\circ}\text{C}$

	圧縮速度 v	変形形式	最大反抗力	破壊回数	反抗力曲線の鋸歯平均間隔
(a)	2.3 mm/min	塑性	1.6 kg/cm ²		
(b)	4.2	破壊から 塑性へ	0.63 1.4	14	1.2 mm
(c)	6.6	破壊	0.54	54	0.45
(d)	28	破壊	0.3	103	0.19

(e) は (d) の圧縮部境界附近の顕微鏡写真 (試料製作, 撮影共に小島による⁵⁾)。上半の雪粒が密集している部分 (XY より上部) が圧縮部。

III. 変形形式の説明 塑性変形, 破壊変形, 第2種破壊変形

圧縮速度の大小により、雪の変形形式が破壊変形と塑性変形の二つに別けられることは、前報告³⁾に詳しく述べた。又、その大体をこの報告の緒言でも説明した。それに関連して、ここに第2図の写真を示す。

第2図は、積雪層から切取った雪塊を横にねかし、上から圧縮板Pをめりこませたものを切断し、それに色水検査を施した写真である。積雪は層状組織をもっているので、雪塊を水平に置いて圧縮すると、圧縮が進むにつれて各層の性質が次々と現われ、変形は複雑となる。併し、雪塊を横にねかして、圧縮が層に平行な方向に進むようにすると、圧縮方向に対して雪の性質は一樣なので、一樣な雪についての圧縮性質が現われるわけである。前報告³⁾にも述べたように、この場合の雪の抵抗力は非常に規則的である。今回の報告にある雪の圧縮は、最後の第VII節の場合を徐き、すべて、層に平行な方向に行われた。

第2図で、圧縮速度は(a)(b)(c)(d)の順に大きくなっている。(a)では塑性変形、(b)(c)(d)では破壊変形が起っている。(a)の場合、圧縮板がめりこんで出来た穴の断面の形は摺鉢型である。穴の底の下の圧縮された雪は濃く着色されてはいるが、その着色は周りに向つて次第に薄くなつていて、はつきりした着色部の境界は見られない。(b)は、圧縮速度を限界速度にまで増大した場合である。圧縮速度が限界速度附近にあるため、始め破壊変形していたのが、後に塑性変形に移行した場合であつて、後で述べる第12図と同形の抵抗力曲線を示した。穴の壁は摺鉢型ではなく、鉛直である。圧縮された雪の中には、濃く染まつた縞模様が見える。各々の縞が、破壊圧縮における間歇的破壊の各破壊に対応するものと考えられる。圧縮板が下降するにつれ、雪は塑性圧縮されて抵抗力は増して行くが、ある程度に達すると、圧縮された雪の下部において破壊が起り、それと同時に抵抗力が急激に降下するということが間歇的に起るものと考えられる。縞模様の白い部分は、この破壊された部分の上部にあつて塑性変形だけをうけた部分である。

圧縮速度を更に増すにつれ、前に述べたように、間歇的破壊は頻繁に起るようになり、(c)のように縞の間隔は狭くなる。尚圧縮速度の速い(d)の場合には、縞は消えて、圧縮部は一樣に染まつた。このときの抵抗力曲線によつて見ると、この場合103回の破壊が起つていたのである。即ち、103本の縞が出来る筈であるが、それが厚さ3cmの圧縮部に詰めこまれたため、縞模様は見掛上見えなくなつてしまつたものと解釈される。

第2図の(e)は、(d)の濃く染まつた圧縮部分と、その周りの白い部分との境を含むように1mm程の厚さに雪を切り取り、顕微鏡で撮つたものである⁵⁾。上半分が圧縮部分で、下半分は圧縮されなかつた部分であるが、顕微鏡的に見ても、これら両部分の境界はかなりはつきりしている。

以上、圧縮速度によつて塑性圧縮と破壊圧縮との2種類の形式が存在することを述べてきたが、破壊圧縮は更に2種類に分類した方が便利のようである。

雪の柱が破壊圧縮をうけているときには、破壊は柱の上面か下面の圧縮板又は台と接触する所で起り、破壊された雪は粉状になつて、周りに押出されて来る。併し、雪の柱が 0°C で湿つていると、押出されて来る雪は粉状ではなく、連続した薄い膜の形をとることを、前回の報告³⁾で述べた。(前回の報告の第5図の写真をみよ。)しかし、このようなことは、 0°C でなくても、圧縮速度がある程度以上に大きければ、 0°C 以下数度の温度に於いても起る。反抗力曲線の鋸歯は、高さも幅も非常に減少して、小さな細かい変動をもつた連続曲線に近くなる。このような破壊圧縮は、今迄述べて来た破壊圧縮と区別した方がよいと考えるので、以後、それを第2種の破壊変形ということにする。

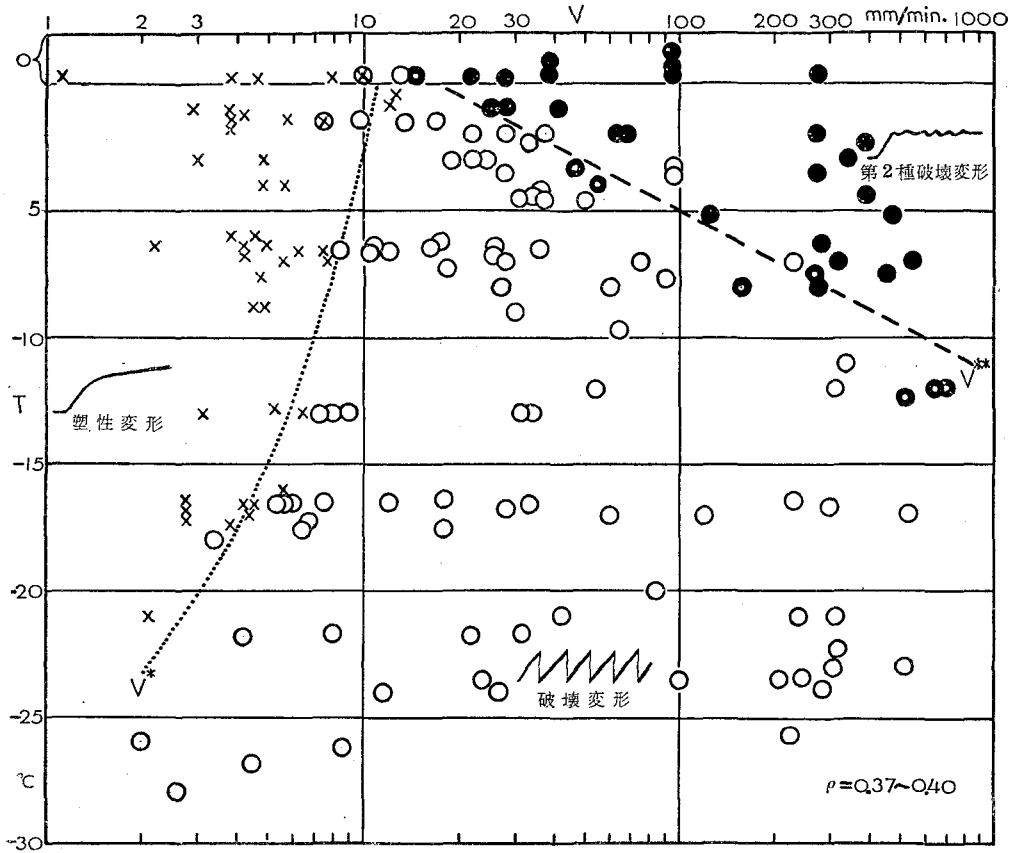
雪塊に圧縮板を押込む場合には、破壊された雪は圧縮板の下に貯えられて外に出て来ないので、外見からは第2種破壊変形か否かを見分けられない。雪塊の切断面の色水検査によつても、区別はつけられない。併し、反抗力曲線には、雪の柱の場合と同じ変化が認められるので、それで区別がつけられる。

雪の柱の破壊圧縮の場合、破壊は雪の柱の上下両端面の他物体と接触する部分で起る。これは、雪と他の物体との接触が、雪の破壊に影響を及ぼすことを示すことのように見えるので、次のような実験を行つてみた。圧縮板と雪の柱の上面との間、或いは雪の柱の下面とそれをのせる台との間には、明らかに大きな摩擦がある。この摩擦が雪の柱の端面での間歇的破壊の原因であるかも知れない。それで、圧縮板と雪の柱の上面との間と、柱の下面と台との間に、現在のところ雪との摩擦が最も小さい物質と考えられているテフロン薄膜を挟んで圧縮してみた。併し、効果は殆んど見られず、間歇的破壊はテフロンと雪との接触面で起つた。又、雪の柱の途中にも、テフロンや鉄板を挟んで圧縮実験を行つた。雪との接触という点からみれば、雪と圧縮板、雪と途中に挟んだテフロン又は鉄板との関係は同じである。所が、間歇的破壊はやはり雪の柱の上面か下面で起ることが多く、途中に挟んだテフロンや鉄板と雪との接触面では、稀にしか起らなかつた。こんなわけで、雪と他物体との接触が圧縮に及ぼす影響は明らかでない。一方後に第VII節で述べるように、著しい層組織をもつ雪の柱を層に垂直に圧縮するときには、雪の柱の途中でも、間歇的破壊が起り得る。

IV. 圧縮速度、変形形式と温度との関係

密度 $0.37\sim 0.4$ のしまり雪から、積雪層に平行に切取つた一様な雪の円柱について求めた、圧縮速度、温度、変形形式(塑性変形、破壊変形、第2種破壊変形)の関係を示したのが第3図である。実験に用いた雪の柱の高さは $10\sim 15\text{ cm}$ であつた。先にも注意したように、この場合、雪は圧縮方向について一様な性質をもつて居り、図に見られるように、各形式の範囲はかなりはつきりと区別され、規則的な結果が得られた。

第3図で塑性変形範囲と破壊変形範囲との境界線が、塑性変形—破壊変形に関する限界速度 v^* と温度 T との関係を与える。 v^* は温度が低い程、小さい。 0°C で 11 mm/min 位、 -10°C で 7 mm/min 位、 -25°C で 2 mm/min 位である。このことは金属に見られる低温脆性を思



第3図 雪の柱の変形形式と圧縮速度 v 、雪温度 T との関係。×印は塑性変形，○印は破壊変形，●印は第2種破壊変形を表す。×印と○印が重なったものは破壊変形から塑性変形に移行したもの。太い丸印は破壊変形と第2種破壊変形の中間型。雪の柱の高さは10~15 cm。しまり雪。

い出させる。 v^* (mm/min)と T (°C)との関係は近似的に次の式で表される。

$$v^* = 11 + 0.4T$$

破壊変形と第2種破壊変形に関する限界速度を v^{**} とすると、 v^{**} は v^* とは反対に、温度の降下と共に圧縮速度の大きい方にずれて行く。但し、 v^{**} は v^* 程には明確なものではない。反抗力曲線の鋸歯状性は圧縮速度が大きくなるにつれ、徐々に崩れて行つて、遂に細かい変動を伴う連続性に移行し、その移行の起る範囲に対応する v の値を v^{**} としているからである。 v^{**} は0°Cで17 mm/min位、-5°Cで100 mm/min、-10°Cで600 mm/min位で、近似的に次の式で表される。(v^{**} は mm/min, T は °C の単位)

$$v^{**} = 17 \times 10^{-0.154T}$$

0°Cでは雪は色々な程度に水を含み得る。従つて、雪の含水率と変形形式との関係が問題

になるが、第3図に表されている 0°C の雪は、すべて含水率の余り大きくない雪である。含水率と v^* 、 v^{**} との関係については、将来研究する予定である。

第3図は密度 $0.37\sim 0.4$ のしまり雪についてのものであるが、他の密度の雪についても、大体同じ傾向が見られる。例えば、密度 0.29 、温度 -1.3°C では $v^*\approx 10\text{ mm/min}$ 、 $v^{**}\approx 40\text{ mm/min}$ 、温度 0°C では、 $v^*\approx 10\text{ mm/min}$ 、 $v^{**}\approx 20\text{ mm/min}$ 。密度 0.23 、温度 -1°C では、雪の柱の高さ 15 cm のとき、 $v^*\approx 7\text{ mm/min}$ 、 $v^{**}\approx 40\text{ mm/min}$ であつた。

ここで、雪の柱の塑性変形と破壊変形とを分割する圧縮限界速度 v^* について、次のような問題がある。塑性変形は雪の柱全体にわたる一様な圧縮によつて起るので、塑性変形の有様は、柱の単位長さについての圧縮によつて、即ち、柱の高さを l とすれば、 $v=v/l$ によつてきまる筈である。従つて、塑性変形の起る範囲の限界は v のある値 v^* によつてきまらなければならない。つまり、その範囲の限界を圧縮速度 v^* そのものによつて示そうとすれば、その圧縮限界速度 v^* は柱の長さ l によつて変り、 l が大きければ、 v^* はそれに比例して増大しなければならない。他方、破壊変形は、雪の柱の端面で間歇的に起る。端面を除いた柱全体は外見上なんの変化もうけていないように見える。従つて、もし端面での状態だけで破壊変形が起るものと考えれば、破壊変形範囲の限界は柱の長さ l には無関係であるべき筈である。即ち、破壊変形の限界は圧縮速度そのものの限界値 v^* によつて与えられることになる。所で、これら二つの限界、塑性変形の限界と破壊変形の限界とは一致すべきものである。而るに前者は柱の長さ l によつて変り、後者は l には無関係である。これは明らかに矛盾である。

併し、破壊変形が雪の柱の端面において起るのは、端面が圧縮板(或いは雪の柱の台)と雪の柱との間に挟まれて受ける圧縮力によるはずである。そしてこの圧縮力は雪の柱の単位長さについての圧縮量によつてきまる筈である。とすると、破壊変形も圧縮速度 v そのものではなく、柱の単位長さについての圧縮速度 v/l によつて定まることとなり、破壊変形の範囲の限界も v/l の或る値 v^* によつて決定されることになる。これならば、上にあげた矛盾は起らない。しかし、実験の結果では、次に述べるように、両変形の範囲の境界は v^* によつてではなく、 v^* によつて定められるように見えるのである。

先に密度 0.23 、高さ 15 cm の雪の柱では、温度 -1°C で限界圧縮速度 v^* が 7 mm/min であることを述べた。所が、同じ雪で高さがその約 $1/4$ の 4 cm の円柱を作り、同じ温度で実験してみたなら、 $v^*\approx 5\text{ mm/min}$ となつた。低い円柱の v^* は、高さが4倍の高い円柱の v^* の 0.7 倍になつたわけである。この v^* を柱の高さ l で割つた v^*/l は、高さ 15 cm のとき $8\times 10^{-4}/\text{sec}$ 、高さ 4 cm のとき $20\times 10^{-4}/\text{sec}$ で、低い円柱の v^*/l は高い円柱の v^*/l の 2.5 倍となる。即ち、柱の長さを変えると、 v^* よりも v^*/l の方が遙かに大きく変るのである。

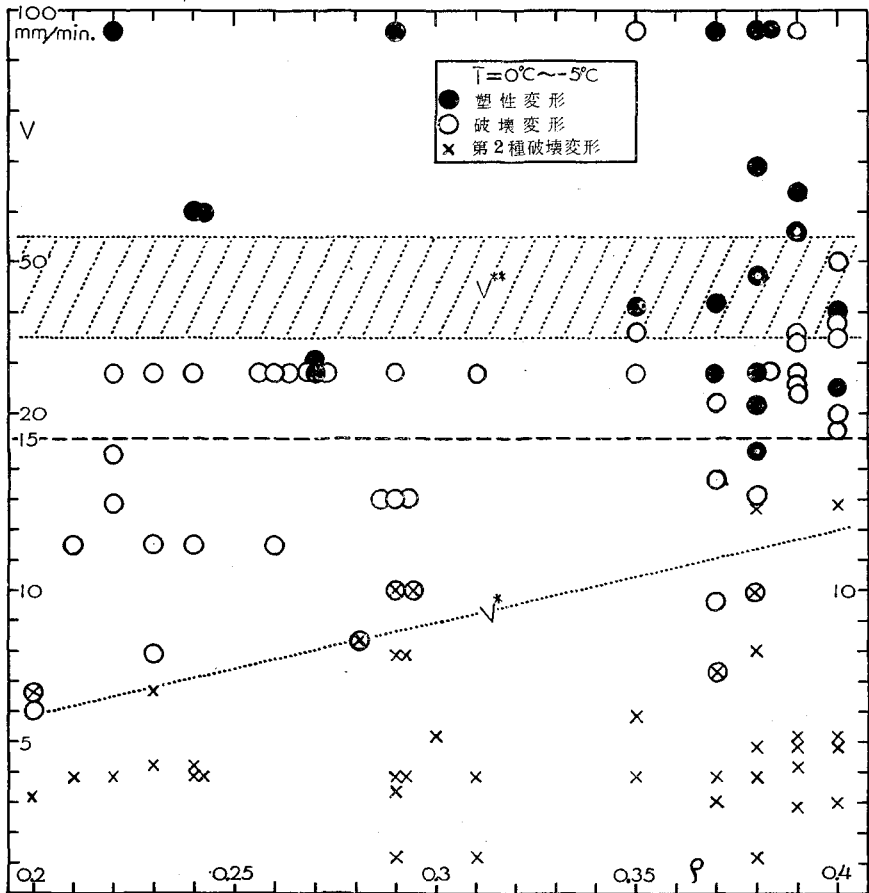
この問題は、以上のように未解決であるが、雪と圧縮板との接触というような、雪と他物体との関係が強く作用しているのかも知れない。それはともかくとして、ここにあげた実験結果は v^* ではなく v^*/l が限界速度として適当であることを示すようなので、第3図に於いても、 v^*/l を用いず v^*/l の方を使つたわけである。

雪塊の中に圧縮板を雪層に平行に押込んだ場合にも、第3図と同じような図が得られた。密度0.23の雪塊では、温度 -1°C で $v^* \approx 4.2 \text{ mm/min}$ であった。同じ雪の柱の場合、柱の高さ15 cmでは、前述のように、 $v^* \approx 7 \text{ mm/min}$ 、4 cmでは $v^* \approx 5 \text{ mm/min}$ であった。何れの場合に比べても、 v^* は雪塊の方が小さい。これは、雪塊では圧縮板の下にあつて圧縮をうけている雪の部分の厚さが、4 cmよりも薄いことを示唆するものと考えられる。

V. 雪の圧縮と雪の密度との関係

(1) 限界圧縮速度 v^* 、 v^{**} と雪の密度 ρ との関係 塑性変形と破壊変形とを分割する限界圧縮速度 v^* 、破壊変形と第2種破壊変形とを分割する限界圧縮速度 v^{**} は雪の性質によつて違う。ここに、雪の性質をその密度 ρ で代表して、 v^* 、 v^{**} と ρ との関係を第4図に示した。

v^* 、 v^{**} は、第3図に見られるように、温度によつてもかなり変化するので、温度は $0^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$



第4図 限界圧縮速度 v^* 、 v^{**} と雪の密度 ρ との関係。各点の記号の意味は第3図に同じ。雪の柱の高さは10~15 cm。しまり雪。

の範囲に限定した。又、限界速度は圧縮される雪の柱の高さによつて違い、又雪塊の中に圧縮板を押込む場合には、雪の柱の場合とは違つた値を与える。それで、ここには高さ 10~15 cm のしまり雪の柱について得られた実験結果をあげた。

第 4 図は圧縮速度 v と密度 ρ との平面内に、変形形式を第 3 図で使つたのと同じ印で表したものである。塑性変形の \times 印と破壊変形の \circ 印との存在領域の境は、斜めの点線で表されるであろう。従つて、この斜線が v^* を与え、 v^* と ρ (gr/cm^3) との関係は

$$v^* = 30 \rho \text{ mm/min}$$

で表される。

破壊変形と第 2 種破壊変形との境界は、先にも述べた通り、塑性変形と破壊変形との境界程はつきりしたのではない。第 4 図に於いても、その境界は図の上部に斜線を施して表わした帯で示されると考えるのが適當であろう。密度 ρ には余り関係をもたないように思われる。このことから、 v^{**} は密度に殆んど無関係に

$$35 \text{ mm/min} < v^{**} < 55 \text{ mm/min}$$

であるとしてよいであろう。

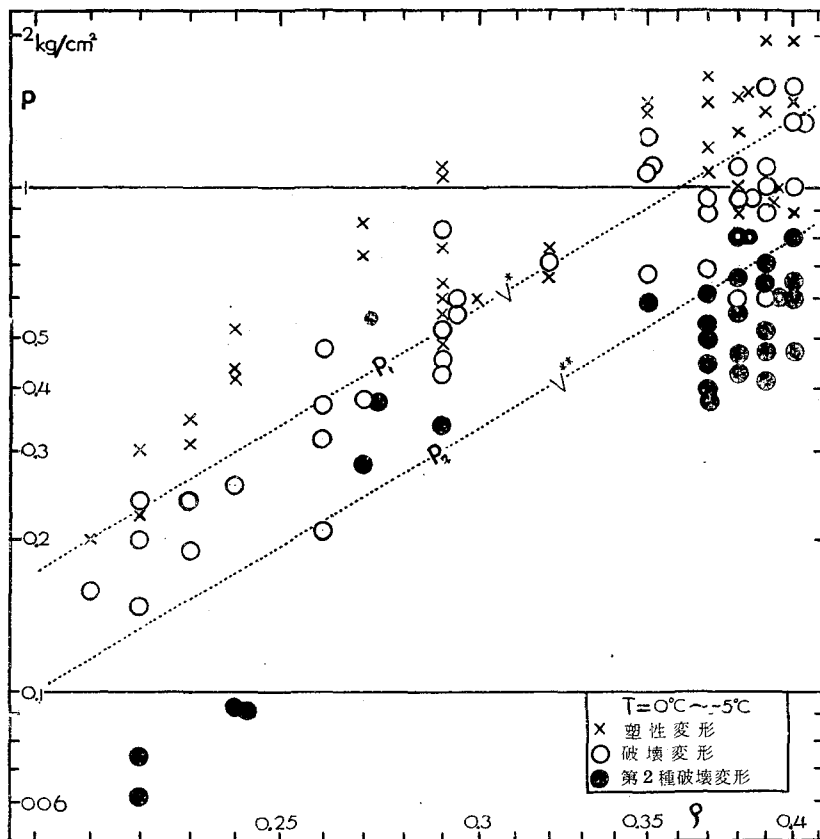
(2) 雪の圧縮抵抗 p と雪の密度 ρ との関係 圧縮に対する雪の単位面積当りの反抗力 p は圧縮速度によつて非常に変り、且つ反抗力の作用のしかたも変る。それで、 p と雪の密度 ρ との関係をなるべく簡単な形で表わすには、限界速度 v^* 、 v^{**} における p の値を ρ に関して考えるのが適當のように思われる。第 5 図は、そのような意図のもとに、第 3 図、第 4 図で使つたのと同じ記号を使つて、変形形式を p - ρ 面の上に表わしたものである。試料は第 4 図に使つたものと同じで、高さ 10~15 cm の雪の柱を $0^\circ \sim -5^\circ\text{C}$ の範囲で圧縮して得たものである。ある密度に対して、沢山の印があるが、下の方の印程大きな圧縮速度に対応する。

縦軸に p を、横軸に ρ を、共に対数目盛でとつてある。ここでの p の意味は次のようなものである。破壊変形では p は鋸歯状に最大値 p^* と最小値 p_* の間を往復する。破壊変形の場合の p としては反抗力曲線に現われた各鋸歯の p^* の中で最も大きい値をとつた。塑性変形の場合は、圧縮を進めて行けばいつまでも p は増大する。それで、雪の柱が全長の 5% 圧縮されたときの p の値をとつてある。第 2 種破壊変形では、 p はほぼ一定値を保ち変動は小さいが、その中の平均値をとつた。各変形形式の境はかなりはつきりと、 v^* 、 v^{**} の印をつけた 2 本の点線で表される。これらの直線によつて v^* 、 v^{**} に対応する p の値が示される。今、その p の値を夫々 p_1 、 p_2 とすれば

$$p_1 = 21.4 \times \rho^3$$

$$p_2 = 12.6 \times \rho^3$$

となる。ここで p_1 、 p_2 は kg/cm^2 、 ρ は gr/cm^3 の単位である。

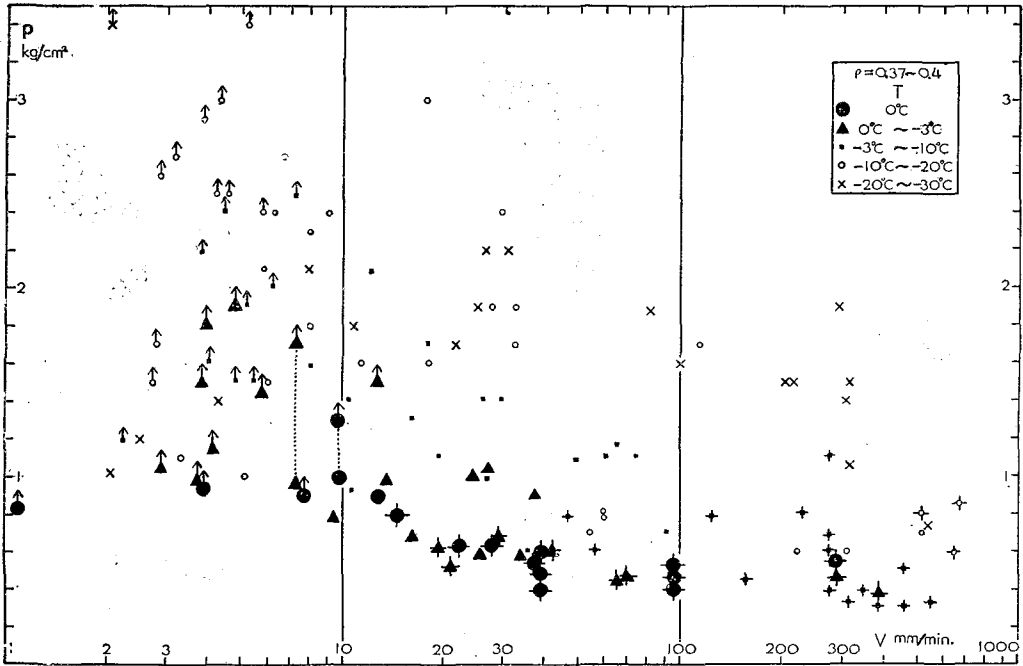


第5図 雪の圧縮抵抗 p と雪の密度 ρ との関係。各点の記号の意味は第3図、第4図に同じ。雪の柱の高さは10~15 cm。しまり雪。

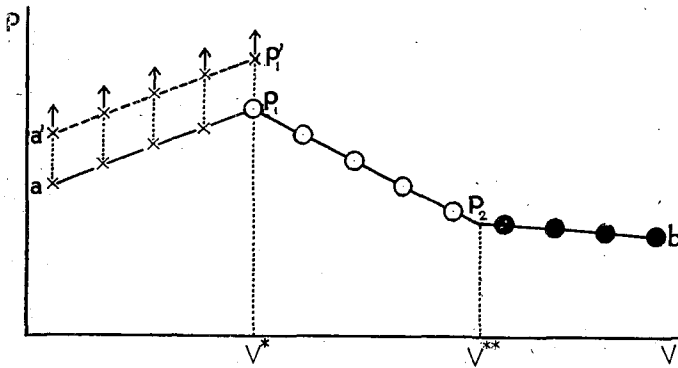
(3) 雪の圧縮抵抗 p と圧縮速度 v 、温度 T との関係 上の二つの項(1)(2)の第4, 5図では温度を -5°C 以上に限った。第4図、第5図と同じものを色々な温度範囲について書けば、温度の影響を示すことが出来るわけである。しかし、そのためにはまだ資料が足りないので、ここには密度範囲を $0.37\sim 0.4$ に限って、色々な温度についての p と v との関係を第6図に示すことにする。第3図を作るに基とした実験に基づくものである。この p の意味は前項(2)におけるのと同じである。

温度は印の形の違いで示してある。塑性変形の場合の p は5%の圧縮に対する値であるが、上向きの矢印をつけた。この矢印は、圧縮を5%を超えて続ければ、 p の値がもつと大きくなることを示している。第2種破壊変形は、印に十字を重ねて示した。矢印も十字もついていないのが破壊変形である。

大体の傾向として次の事が云える。塑性変形の場合、圧縮速度 v が増大して限界速度 v^* に近づく程、反抗力 p は大きくなる。ところが v が v^* を超えて破壊変形が起るようになると、



第 6 図 密度 0.37~0.4 のしまり雪の円柱の単位面積当りの反抗力 p と圧縮速度 v 、温度 T との関係。上向き矢印がついた点は塑性変形 (歪 5% のときの p の値を示す)。十字を重ねた点は第 2 種破壊変形。他の点は破壊変形 (最大反抗力 p^* の最大の値を示す)。点線で結んだ破壊変形の点と塑性変形の点とは、圧縮の途中で破壊変形から塑性変形へ移行したものの。



第 7 図 雪の反抗力 p と圧縮速度 v との関係の模式図。 $v < v^*$ 、 $v^* < v < v^{**}$ 、 $v^{**} < v$ の三つの範囲が夫々塑性変形、破壊変形、第 2 種破壊変形の範囲である。破壊変形に対しては p の最大値 p^* 、第 2 種破壊変形に対しては p の平均値をとつてある。塑性変形範囲の破線 $a'p_1$ は圧縮が 5% に達したときの p の値であり、実線 ap_1 は圧縮初期における 1% 位の小さな圧縮度に対する値である。

v の増大と共に逆に p は減少する。更に v が増して v^{**} を超え、第 2 種破壊になると、 p は更に小さくなる。以上のことを模式的に第 7 図に示した。

第 7 図で、 $v < v^*$ の塑性変形範囲にある破線 $a'p_i$ は 5% の圧縮に対する p の値を表わしている。1% 位の小さい圧縮のときの p は実線 ap_i で表される。 $v^* < v < v^{**}$ に対応する破壊変形範囲では、最大抵抗力 p^* (鋸歯の頂) をとつてあるが、 p が p^* に達したときの雪の圧縮度は小さいものである。それで、塑性圧縮に関しても、圧縮度の小さいときの p の値を採用すれば、 $v = v^*$ に於いて破壊変形における p^* ($= p_i$) と一致するようになる。

温度との関係については、温度が低い程、 p が大きくなるという傾向が見られる。

以上は密度 0.37~0.40 のしまり雪の柱についてのものであるが、他の密度の雪についても定性的には同じ傾向が見られる。

VI. 再 圧 縮

雪を圧縮した後、数分間圧縮を中止して、再び圧縮を始めると、1 回目の圧縮に比べて、大分雪の変形の様子が違つて来る。顕著な違いは次のようなものである。

(1) 再圧縮による限界速度 v^* の移動 積雪は、塑性変形を受けている限りにおいては、圧縮が進むにつれて抵抗力は増し続け、かなり大きな値に迄達する。このように一度塑性変形を受けて大きな力に耐え得た雪について、暫く圧縮を中止して、再び圧縮実験を行うと、限界速度 v^* が大きな方に移ることが解つた。密度 0.23, 高さ 15 cm, 直径 6.9 cm のしまり雪の円柱を 3.8 mm/min の速度で、3 分間塑性圧縮した後、数分間休んでから夫々 12.8, 17.5, 28 mm/min の速度で再圧縮した。12.8 mm/min では再び塑性圧縮が起つたが、17.5 mm/min, 28 mm/min では破壊が起つた。従つて、この再圧縮の場合の限界速度 v^* は、 $12.8 < v^* < 17.5$ である。所がこの雪の初圧縮実験では、限界速度 v^* は、 $6.6 < v^* < 7.9$ であつた。 v^* は再圧縮では約 2 倍になつたわけである。

1 回目の塑性圧縮を上の場合よりもつと長く続けた後で再圧縮すると、限界速度の増大はもつと大きくなる。

(2) 硬化現象 一度変形を受けた雪は一般に硬化するが、この効果は 1 回目の圧縮が塑性圧縮の場合に、特に顕著に現われた。ここで硬化という意味は、同じ圧縮速度に対する抵抗力 p が大きくなるということである。

ここで言葉の便宜上、再圧縮の前の第 1 回目の圧縮を予備圧縮ということにする。そして同じ性質の別の試料について、再圧縮を行う目的を持たずに行う初めての圧縮を初圧縮ということにする。

次の表に同じ圧縮速度に対する初圧縮と再圧縮の場合の p があげてあるが、いずれの場合も、初圧縮に比べて再圧縮では p が 2 倍近くからそれ以上に大きくなつてゐる。(p は前と同様、塑性変形のときは 5% の圧縮に対する値、破壊変形のときは最大抵抗力 p^* の最大値である。)

第 1 表

密 度	温 度	予備塑性圧縮 の最終反抗力	再 圧 縮	再圧縮と同じ速度の初圧縮					
				変形形式	圧縮速度	反抗力 p	弾 性 率 E^* 又は粘性率 η^*	変形形式	反抗力 p
gr/cm ³	°C	kg/cm ²		mm/min	kg/cm ²	$E: 10^7 \text{dyne/cm}^2$ $\eta: 10^8 \text{dyne-sec/cm}^2$		kg/cm ²	$E: 10^7 \text{dyne/cm}^2$ $\eta: 10^8 \text{dyne-sec/cm}^2$
0.21	- 2	0.52	塑 性	11.5	0.7	—	破 壊	0.16	—
0.23	- 3.2	0.44	〃	12.8	0.48	—	〃	0.28	—
0.23	- 1.5	0.41	〃	12.8	0.6	—	〃	0.28	—
0.23	- 3.2	0.55	破 壊	17.5	0.41	10	〃	0.2	5
0.23	- 3.2	0.54	〃	28	0.38	10	〃	0.15	5
0.27	- 1.5	1.1	〃	39.5	0.85	19	〃	0.77	20
0.29	0	0.75	第2種破壊	28	0.53	—	第2種破壊	0.29	—
0.29	- 1.3	0.67	塑 性	11.5	1.1	—	破 壊	0.52	—
0.26 ^{**}	- 3.5	1.13	〃	11.5	1.9	—	〃	0.26	—
0.30 ^{**}	- 2.4	0.83	〃	28	1.16	—	〃	0.43	—
0.24~0.35 ^{***}	- 2	0.36	〃	3.8	0.4	7	塑 性	0.2	4
0.21	- 1.3	0.75	〃	1.1	0.77	6	〃	0.75	5
0.29	- 3.6	1.06	〃	3.7	1.5	16	〃	0.49	7
0.38	- 3	4	〃	3.3	4.2	46	〃	1.9	23
0.38	- 6.5	2.3	〃	2.2	2.3	36	〃	1.3	24
0.38	- 16.5	2.7	〃	4.4	3.0	37	〃	2.5	30
0.26~0.37 ^{***}	- 2	1.3	〃	3.8	1.6	3.6	破壊→塑性	1.2	2.9

* 弾性率 E は破壊変形の場合、粘性率 η は塑性変形の場合である。

** 2層からなる雪の円柱を層に垂直に圧縮。

*** ざらめ層を含む数層からなる雪の円柱を層に垂直に圧縮。

積雪における変形速度と変形形式との関係 II

前回の報告³⁾に示したように、破壊変形の場合には、鋸歯状反抗力曲線から雪の弾性率 E が求められる。第1表にあげてある E の値から解るように、初圧縮、再圧縮が共に破壊変形するとき、再圧縮での E は初圧縮での E よりも大きい。又、塑性変形に対しては、これも前回の報告³⁾に示した意味で、粘性係数 η が求められる。初圧縮、再圧縮が共に塑性変形であつた場合には、第1表に示した通り、 η は再圧縮に際して大きい。 E, η が大きくなることも亦、「硬い」という意味を持つている。

(3) 破壊位置の移動 前項(2)では予備圧縮が塑性変形の場合のみを取扱つたが、予備圧縮が破壊変形の場合には、初圧縮と再圧縮との間に殆んど差異が認められないのが普通である。或る速度で破壊圧縮を始め、数分間休んで、再び同じ試料を同じ速度で圧縮しても(この場合、初圧縮と再圧縮とのために別々の試料を用いる必要はない)、休止以前と変りはない。これは、破壊が雪の柱の端面で起り、破壊せずに残つている部分には、少なくとも外見上、変化が起らないということからも予想される結果である。

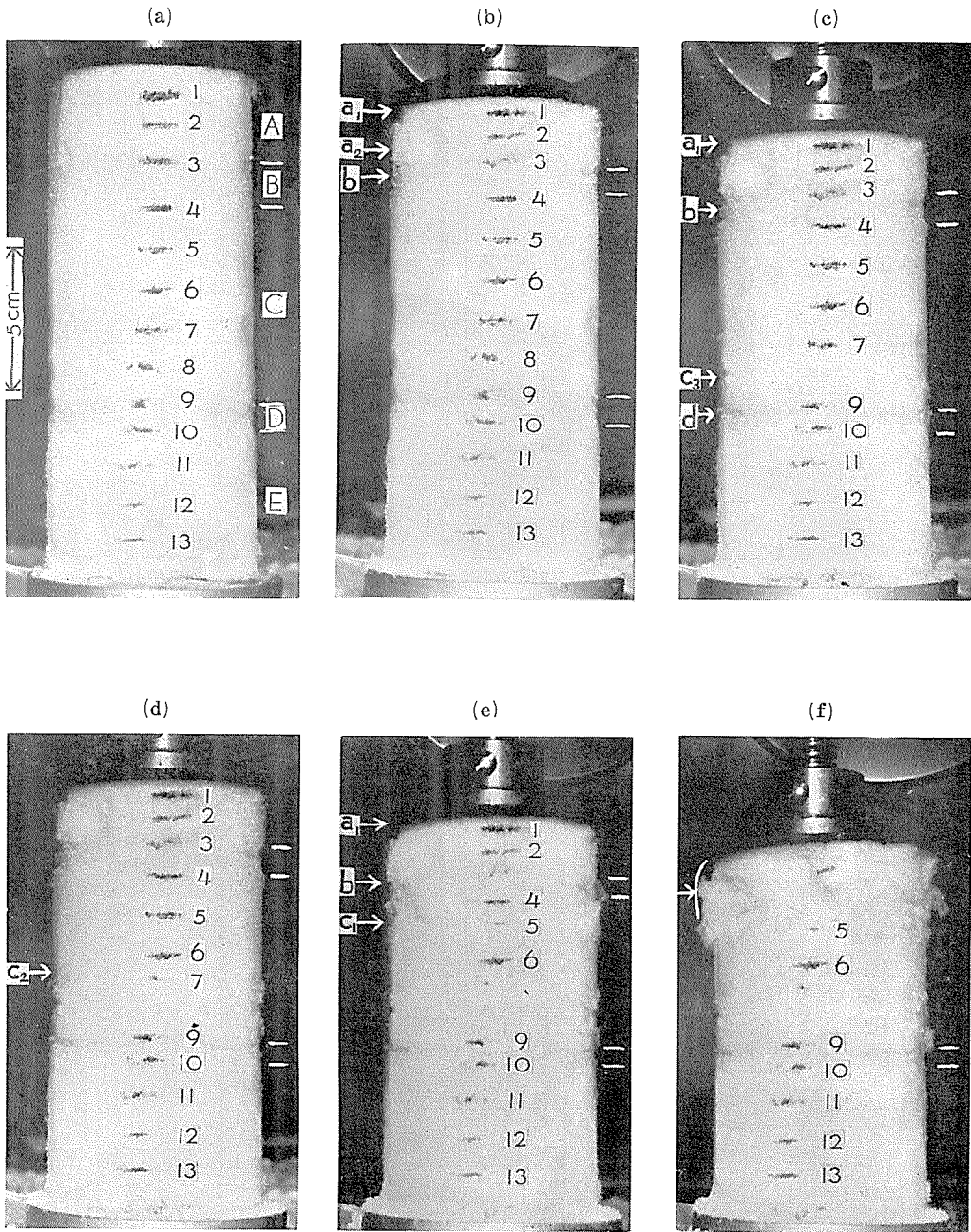
併し時には、初回の圧縮では雪の柱の上面で破壊が起つていたのに、休止後の圧縮では破壊が柱の下面で起るというような場合がある。このようなときには、 p^* の値が再圧縮では、初圧縮の場合に比べて大きくなることが多い。一例をあげると、密度 0.27、温度 -4.8°C の雪の柱を 28 mm/min の速度で圧縮したとき、 p^* は始め 0.22 kg/cm^2 であつたものが、休止後は 0.32 kg/cm^2 にふえた。この場合、雪の柱は、これ迄この報告で扱つて来たすべての場合と同様、積雪からその層に平行な方向に切り出したもので、柱の方向に沿つては、雪の性質に変化はない筈である。それにも拘わらず、このように、破壊面が交替し、それと同時に p^* の値も変化したわけである。

VII. 異なる層からなる不連続構造の雪の円柱の圧縮

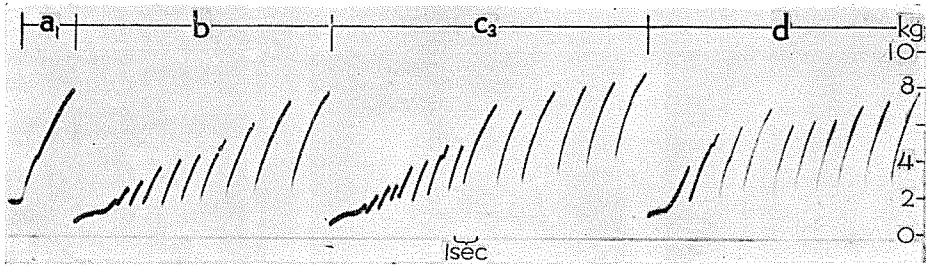
これまででは、雪柱の場合も雪塊の場合も、圧縮は、圧縮方向に沿つて雪の性質が変らないように、雪の層状組織の層に平行に行つて来た。前回の報告³⁾に於いては、層に垂直な方向に圧縮した場合もあつたが、その場合にも、圧縮方向に対してなるべく雪の性質が変らないように、層によつて性質の余り変つていない雪を選んだ。それと反対に、次に、性質が著しく異なる層からなる雪の柱を、層に垂直な方向に圧縮した場合について述べる。

第8図は、A, B, C, D, E なる5個の異なる層を持つ雪の柱を、途中に4回休止を入れて圧縮したときの変化の経過を示している。(a)は始めの状態である。A, C, E 層は密度のかなり違うしまり雪で、B 層と D 層とは厚さ 1 cm 程の薄いざらめ層である。圧縮速度 v としては、12.8 mm/min を用い、破壊圧縮が起つた。一般的に云つて、この圧縮速度はしまり雪の限界圧縮速度 v^* に近い。

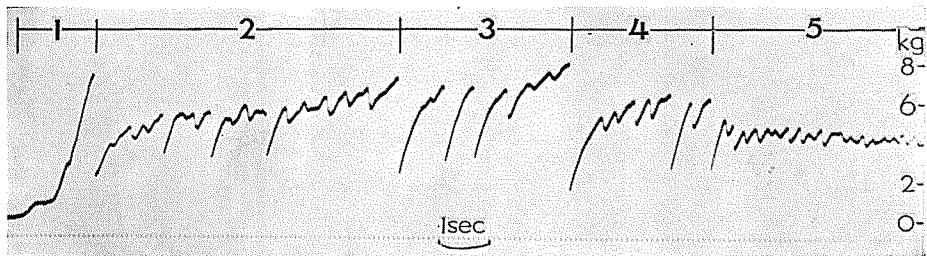
写真(b)は第1回目の圧縮の終つた後である。この圧縮で、間歇的破壊は雪の柱の上端面 a_1 、A 層と B 層との境界より少し上で A 層内部にある a_2 面、及び B 層の上面 b で起つた。雪の柱の表面にはほぼ等間隔に食紅で短い線が 13 本いれてあるが、これを以後上から順に第 1



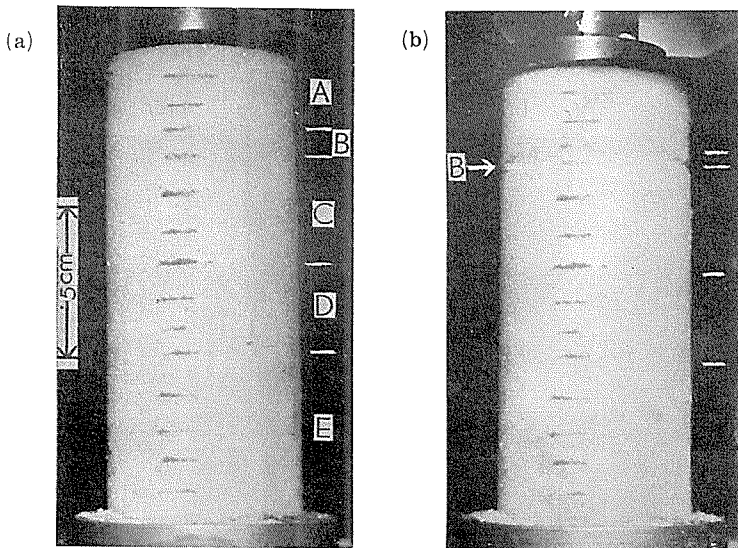
第 8 図 ざらめ層を含んだ不連続構造の雪の円柱の破壊圧縮，矢印は破壊面を示す。
 A, C, E: しまり雪, B, D: ざらめ雪。 $T = -20^{\circ}\text{C}$, 雪密度 $A = 0.24$, $C = 0.27$,
 $E = 0.34$ 。(a) 始, (b) 1 回目圧縮後, (c) 6 分休んで 2 回目圧縮後, (d) 4 分 18 秒
 休んで 3 回目圧縮後, (e) 9 分休んで 4 回目圧縮後, 以上圧縮速度 $v = 12.8 \text{ mm}$
 $/\text{min}$, (f) 5 分 45 秒休んで 5 回目圧縮後, $v = 78 \text{ mm}/\text{min}$ 。



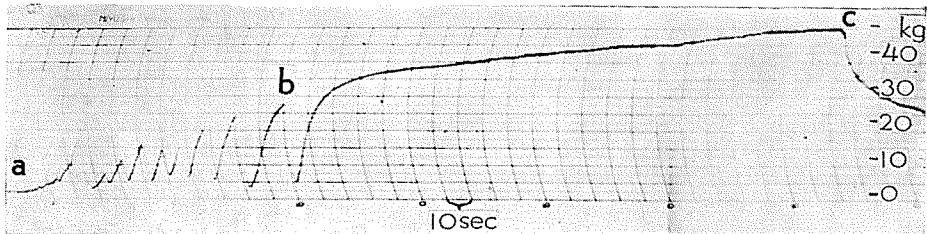
第9図 第8図の雪の柱の第2回目圧縮(写真(b)から(c)までの間)のときの抵抗力曲線。4つの区分 a₁, b, c₃, d は、夫々の面での破壊のときに現れたものである。



第10図 第8図の雪の柱の第5回目圧縮(写真(e)から(f)までの間)のときの抵抗力曲線。



第11図 ざらめ雪を含んだ不連続構造の雪の円柱の圧縮。
A, C, D, E: しまり雪, B: ざらめ雪。T = -2°C
v = 3.8 mm/min。雪密度 A = 0.26, C = 0.32, D = 0.35, E = 0.37。(a) 始, (b) 圧縮開始後2分20秒, B層だけが破壊している。以後、塑性圧縮をうける。



第12図 第11図の圧縮のときの抵抗力曲線。a~bはB層の破壊, b~cは他層の塑性圧縮のときに現れたものである。

線, 第2線ということにする。柱の上端と第1線の間, 第2線と第3線との間が縮んでいるが, これは a_1 面, a_2 面で破壊が起つたことの結果である。第3線は, 丁度 A 層と B 層との境にあるが, この第3線は b 面での破壊のために大部薄くなつた。

6分間休止した後再び圧縮をした結果, 写真(c)のようになつた。この圧縮では, 柱の上部としては a_1 面, b 面だけに破壊が起り, a_2 面では起らなかつた。その代り, C 層内部にある c_3 面と D 層内の d 面とで新たに破壊が始まつた。ついで4分休止後の圧縮では, C 層に属する c_2 面でのみ破壊して, 写真(d)の状態となり, 9分休止後の圧縮では, 休んでいた a_1 面, b 面が再び破壊面となり(第2表に示すように, 1, 2回目圧縮のときに比べて, 抵抗力 p^* は増大している), 又 C 層の上層である c_1 面が新しい破壊面として加わつた。この第4回目の圧縮後の有様が写真(e)である。最後の第5回目の圧縮は, 6分休止の後, 圧縮速度 v を2倍以上にあげて 28 mm/min の速度で行つた。その結果写真(f)の状態になつたが, この圧縮では第5線より上の部分だけに破壊が起つた。幾つかの破壊面で間歇的破壊が起つたのであろうが, 雪の柱の表面が荒れてしまつて, 破壊面の所在を見極めることは困難であつた。

上にみたように, 圧縮の休止によつて破壊面は変更されるが, 継続する一つの圧縮の間にも破壊面は移動する。併し, ある瞬間を捕えると, その時に働いている破壊面は一つで, 同時に二つ以上の面で破壊が起るということはないらしい。そのことは, 抵抗力曲線からうかがわれる。第9図は第2回目の圧縮, 即ち, 第8図の写真(b)と(c)との間の圧縮についての抵抗力曲線である。曲線は4つに区分することが出来, 各区分内で抵抗力曲線は規則的に変化している。二つ或いはそれ以上の破壊面での破壊が同時に起るとしたら, 曲線はこのような規則性は示さないであらう。各区分は左から, a_1 , b, c_3 , d 面での破壊に対応する。

最後の柱の上部全体にわたつて起つたように見える第5回目の圧縮のときの抵抗力曲線を第10図に示した。この場合にも, 曲線は規則的に変化する幾つかの区分に分けることが出来る。従つて, 破壊面の位置を目で見取ることは出来なかつたが, この場合にも亦, 破壊は常に一つの破壊面で起つたのであつて, その破壊面が次々と変更されたのであると考えてよいであらう。

第 2 表

圧縮番号	1 回目			2 回目			3 回目	4 回目		5 回目		
	b	a_2	a_1	a_1	b	c_3	d	c_2	a_1	b	c_1	柱の上部
破壊面 抵抗力 p^* の最大値 (kg/cm ²)	0.08	0.12	0.15	0.17	0.17	0.19	0.17	0.14	0.12	0.20	0.22	0.17

上には, 破壊変形を起すような大きな圧縮速度の場合を考えたが, 次にしまり雪についてなら塑性変形が起るような低速度圧縮の例の一つあげる。第11図の雪の柱は, A, B, C, D, E の5層からなるが, そのうち B 層だけが厚さ約 1 cm の薄いざらめ層で, 他は皆しまり雪である。これを 3.8 mm/min の速度で圧縮した。第12図がそのときの抵抗力曲線である。抵抗力

曲線は始めのうちは鋸歯状を示し、破壊変形を示しているが、この破壊変形はざらめ層 B で起つたのである。B 層が破壊して、雪屑が外に押出されて半分位の厚さになつたとき、破壊変形は止んで、しまり雪の部分の塑性変形が始まつた。第 12 図の鋸歯状曲線に続く滑らかな曲線がそれを示している。ざらめ雪は試料を作るのが難しく、圧縮実験を行い難い。しかし、このことにより、ざらめ雪の限界圧縮速度 v^* がしまり雪のものに比べると、大分小さいことが解る。

前の第 VI 節までは、雪をその層状組織に平行な方向に圧縮したのであつた。そして、破壊変形の破壊面は常に雪の柱の端面であつた。破壊面が変るとしても、上の端面から下の端面に、或いはその逆に移るのであつた。ところが、この節でのように、層状組織に垂直な方向に圧縮を加えると、破壊面は雪の柱の途中に幾つも出来て、破壊はその一つから他のものへと移動する。目で見たところ一様と思われる一つの雪の層の中にも、破壊面の出来ることは、そこも一つの境界面であつて、見掛けは一様であつても、目に見えない細かい層組織の存在を思わせる。

弾性圧縮、塑性圧縮では圧縮の方向によつて余り大きな変化は見られないが、以上のように、破壊圧縮では層構造に関連して方向性が著しく現われるわけである。一様な物質について破壊は“構造敏感”な現象であると云われるが、そのことは雪についても云えるわけである。野外に積つた積雪の構造は簡単ではない。雪崩の発生、発達経過等にも、以上述べて来たような現象が関連しているものと思われる。

補 遺

(1) 雪の円柱が塑性圧縮をうける場合、高さが縮むと同時に、横方向に多少広がる。柱の直径を D 、高さを l として、この横方向の拡がり $4D/D$ の、高さの縮み $-4l/l$ に対する比がこの場合のポアソン比 ν である。 ν は圧縮の程度で異なるが、歪が 0.1~0.2 の場合には、密度が 0.2~0.25 の軟かいしまり雪で 0.15~0.25、密度が 0.3~0.4 の硬いしまり雪で 0.2~0.3 の程度であつた。

(2) 雪の弾性率、粘性率、緩和曲線、反抗力曲線の鋸歯間隔については、前回の報告³⁾と同様な結果が、その後の実験によつても得られた。これらの物理量については、次の機会に総括的に取扱つてみたい。

終りに、この研究に際し色々とお指導をいただいた吉田順五教授、低温科学研究所応用物理部門の方々に感謝の意を表す。又、第 1 図の写真に示した圧縮装置は、モーター、ベルトを除いてその全部が当研究所実験工場員の大方由松、小笠原英治によつて作られたのであつて、筆者の希望する通りによく作動した。これは両氏の優れた伎倆と工夫とによるもので、ここにそれを記して感謝の意を表す。なお、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 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学, **10**, 1.
- 2) 小島賢治 1954 積雪の粘弾性. 低温科学, **12**, 1.
- 3) 木下誠一 1957 積雪に於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.
- 4) Yosida, Z. and Colleagues 1958 Physical studies on deposited snow. IV. Mechanical properties. (3). Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No. **13**.
- 5) 小島賢治 未発表.

Résumé

In the previous paper (reference (3)) the author reported the results of experiments in which snow samples in the form of a pillar or of a large block were compressed at constant speeds v of different magnitudes ranging from 1 mm/min to 40 mm/min. In the case of snow blocks the compression plate was pushed into them. The snow was found to deform in two different manners—plastic and destructive—according to whether v lay below or above a critical speed v^* . The former type of deformation was called “plastic contraction” and the latter “destructive contraction.” The resistance R exhibited by snow against compression increased quite continuously in the case of plastic contraction while it oscillated like a saw-toothed wave between a maximum R^* and a minimum R_* in the case of destructive one.

In the present paper is described the continuation of the experiments reported in the previous paper. It was found that there is another type of destructive contraction which the author names “destructive contraction of the second kind”. This type of contraction occurs when the speed of compression exceeds another critical speed v^{**} larger than v^* . In this case the curve of resistance R loses the saw-toothed feature characteristic to the destructive contraction and comes to be continuous showing only small fluctuations. In addition to such a change in R , the ice fragments which were ejected in pieces from the destroyed part of snow pillar in the case of destructive contraction unite themselves into a thin sheet of ice in the case of destructive contraction of the second kind.

The critical speeds v^* and v^{**} dividing the above stated three types of contraction depend upon the temperature $T^\circ\text{C}$ of snow. The three types are represented for the snow of density 0.37~0.40 by different marks (cross: plastic; light circle: destructive; solid circle: destructive of the second kind) on the $T-v$ plane of Fig. 3 in the text. The three regions divided by the thick broken line and dotted line on the plane contain each only the marks of one type of contraction. Then those dividing lines show the relationships between T and v^* , v^{**} . They can respectively be represented by

$$v^* = 11 + 0.4 T \text{ mm/min and } v^{**} = 17 \times 10^{-0.154T} \text{ mm/min.}$$

The critical speeds v^* , v^{**} depend also upon the density ρ of snow. In like manner as above the three types of contraction are plotted by different marks on the $v-\rho$ plane of Fig. 4 for the restricted range of temperature $0^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$. The plane is divided into

three parts and the dividing lines show the dependency of v^* , v^{**} upon ρ . v^* can be formulated by

$$v^* = 30 \rho \text{ mm/min.}$$

The division between the regions of destructive contraction and of destructive contraction of the second kind is not very clear. The author can do nothing more than to represent v^{**} in a rather vague way as

$$55 \text{ mm/min} > v^{**} > 35 \text{ mm/min,}$$

independently of ρ .

In Fig. 5 the types of contraction are represented on the p - ρ plane where p is the resistance R taken for a unit area, that is, p is R divided by the area A of compression. The marks indicate the value of p at 5% contraction for the plastic contraction and $p^* = R^*/A$ for the destructive contraction. For the destructive contraction of the second kind the mean value of p is adopted. Then the lines dividing the plane into regions of different types of contraction indicate the values of p corresponding to the critical speeds v^* and v^{**} in relation to density ρ . Let these values of p be represented by p_1 and p_2 . Then the relations between p_1 , p_2 and ρ are respectively given by

$$p_1 = 21.4 \rho^3 \text{ kg/cm}^2, \quad p_2 = 12.6 \rho^3 \text{ kg/cm}^2.$$

In Fig. 6 are plotted the values of p and v observed on the snow pillars of densities 0.37~0.40 having different temperatures. The difference in temperature is indicated by the different shapes of marks. One will see from Fig. 6 that the change of p with v can schematically be represented by the curve $a p_1 p_2 b$ of Fig. 7. p tends to increase slowly with increase of v in the region of plastic contraction to reach p_1 at $v=v^*$. Beyond this point, in the region of destructive contraction, p decreases with increasing v and still continues to decrease at somewhat reduced rate after having crossed the second critical point p_2 at $v=v^{**}$. One will, by the aid of Figs. 4, 5 and 7 combined together, be able to get a general idea of how the resistance p of snow depends upon the compression speed v and the density ρ of snow.

The plastic contraction gives no damage to snow but makes it stronger. When snow pillars once subjected to a plastic contraction are compressed destructively p^* is found to have been increased by that plastic contraction, the critical speed v^* also having been shifted towards a larger value at the same time.

All the results of experiment described above were obtained by compressing snow samples parallel to their stratification so as to keep the nature of the snow unchangeable in the direction of compression. The destruction of snow pillars undergoing destructive contraction occurred only at their end planes. But, when the destructive contraction is made to occur perpendicularly to the stratification, the plane of destruction ceases to be confined to the end planes of the snow pillars; many planes within the body of snow pillar become by turns planes of destruction. The series of photographs in Fig. 8 show the destructive contraction of a snow pillar cut out from the snow cover perpendicularly to its stratification. The arrows indicate the position of destruction generated within the body of the pillar.