HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	積雪への円錐の押込み
Author(s)	木下, 誠一
Citation	低温科學. 物理篇, 23, 17-37
Issue Date	1965-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18018
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_p17-37.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Seiiti KINOSITA 1964 Intrusion of a Rigid Cone into Snow. *Low Temperature Science Ser. A, 23.* (With English Summary p. 36)

積雪への円錐の押込み*

木下誠一
(低温科学研究所　凍上学部門)

(昭和39年11月受理)

I. 緒　　言

積雪を，速く変形させると，破壊が起るが，ゆっくり変形させると，破壊が起らずに，塑性的な変形が起る。このように形の違った変形が現れる境界の速度は，雪質や温度で多少異なるが，大体数 mm/min である(境界の速度は変位速度で表される)。境界の速度は，一つの雪について，かなりはっきり定っていて，その速度を前後に僅かに速度が違っても，変形の様式が全く違ってしまう。積雪が現わす自然現象には，非常に複雑なものが多いが，その原因の主要な一つとして上のことがあげられる。筆者は，これまでに雪の円筒を圧縮する実験を行なって，上記の現象を確め，更に雪が及ぼす力や，雪に現われる構造や組織の変化について詳しく調べた[1),2),3),4)]。

しかし，自然堆積物としての積雪には，単に一方向だけから力が作用するのではない。たとえば，除雪などの実際面では，斜めの方向から雪をおすことが，しばしば経験される。それで，今回は，その基礎実験の意味を含めて積雪の中へ剛体の円錐を押込む実験を行なった。この場合には，積雪内部に三軸の応力が働くのであるが，果して，このような場合にも圧縮速度の違いで，雪の変形形式に違いが生ずるのであろうか。又，円錐に及ぼされる抵抗力や雪の構造や組織などにはどのような変化が現われるのであろうか。今回の実験でこれらのことを調べたのである。

用いた円錐は，頂角が6°，30°，60°，90°，120°，150°の6種類で，いずれも砲金で作られたものである。実験に用いた押込みの速度は1～30 mm/min であったが，これまでの雪の円筒の圧縮実験のときと同じく，数 mm/min を境にして僅かな速度の違いで，変形の様式が塑性変形と破壊変形とに別れた。ただ，細く尖った円錐，即ち頂角が6°の円錐の場合だけは，上のような判然とした変形形式の差別が現われなかった。

頂角が色々異なる円錐を雪の中に押込むことは，円錐と雪との接触面にそって作用する垂直応力と剪断応力との割合を色々に変えることである。それで比較のために雪に平板を押込む実験や単純剪断変形を起させる実験も行なった。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第694号

II. 実験方法

1. 実験装置(円錐の押込み) 第1図の**a**が実験装置の写真である。雪の円筒の圧縮実験において使用した装置[1),2)]と同じ原理のものである。写真の左側が駆動部で，モーターと40対1の減速ギヤー2箇とからなる。これらの相互の連結には，各種のプリーとVベルトを用いた。プリーのうちの1つと，写真の右側の厚い鋳物の枠からなる本体(以後単に測定器と呼ぶ)のプリーとをVベルトでつなぐ。駆動部のモーターを動かすと，測定器中央のシャフトが定速度で下降する。その下降の速度は，使用するプリーの組合せで，広汎に変えられる。この実験においては，主として1～30 mm/min の速度を用いた。

シャフトの下端には圧縮ロードセルをつけ，更にその下に円錐をはめる。円錐は，頂角が6°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°の6種類で，それぞれ第1図の**c**, **d**, **e**, **f**, **g**, **h**に示されている。

野外に自然に積った積雪のなかから，20 cm×20 cm，高さ10～20 cm の塊を切取って，測定器の支持台の上にのせる。第1図**a**のように，この塊の上面中央へ円錐の頂点がめりこむようにする。圧縮ロードセルに現われる抵抗力はストレンメーターを通して，電子管式自動平衡のペン書きオッシログラフに記録される。

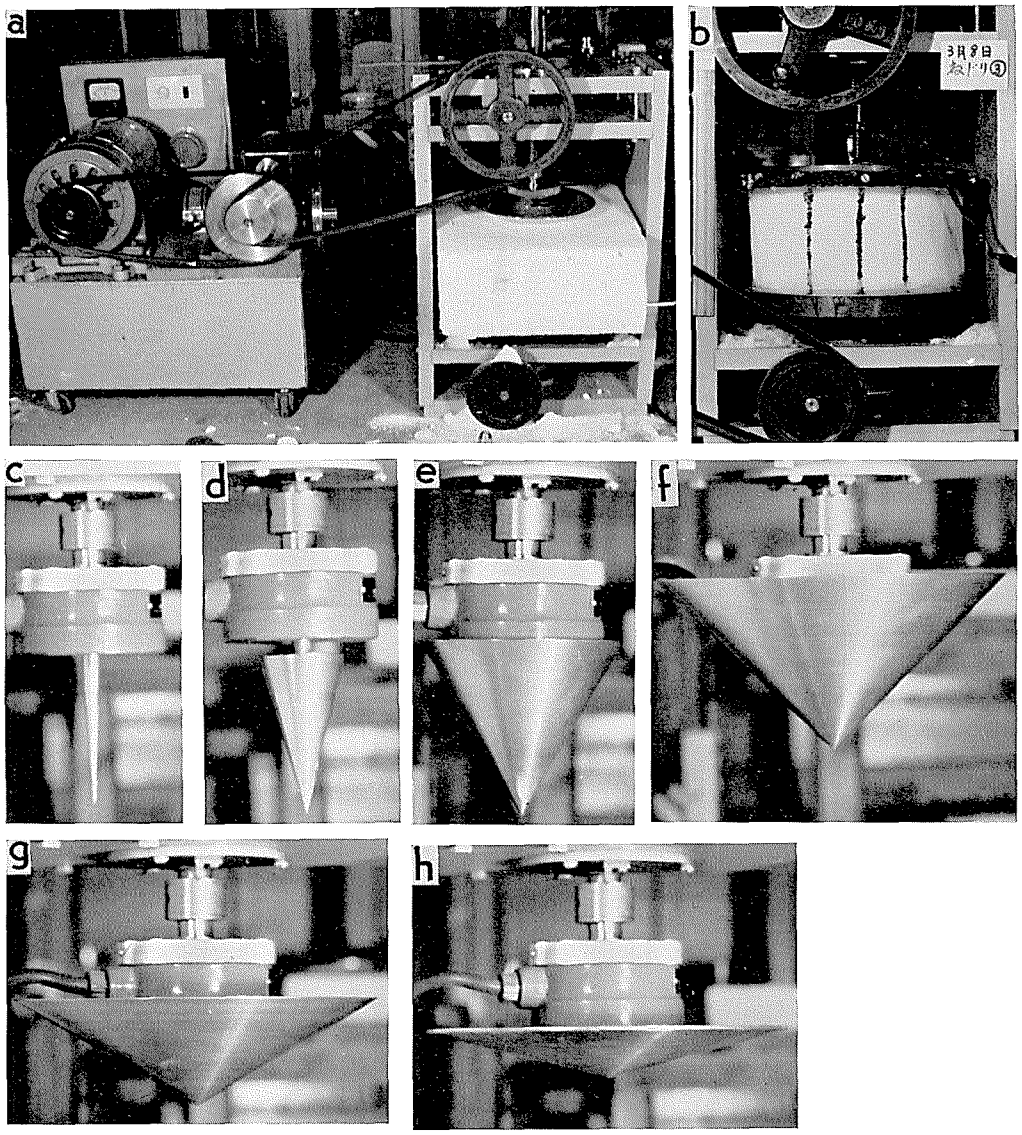
2. 実験装置(剪断変形) 第1図**b**の写真のように圧縮ロードセルをシャフトから外し，そのかわりにつづみ型のトルクセルをシャフト下端にはめる。トルクセルの下に直径30 cm，厚さ2 cm の丈夫な鉄の円板を吊す。この板と支持台との間に，輪状に切取った積雪塊(外径27 cm，内径17 cm，高さ13～18 cm)をはめる。雪の塊の上下両面には，あらかじめアルミの薄い円板を凍りつけておく。上下のアルミ円板は縁にある数箇の穴を通して，上の鉄円板及び下の支持台にそれぞれネジどめされる。測定器の下方にあるプリーを駆動部のプリーにVベルトでつなぎ，モーターを動かすと，下の支持台が回転する。試料の雪の輪がねじられ，そのねじる力をトルクセルで検出する。雪の輪の直径が大きいので，雪の内部には，水平方向に剪断変形だけが起ると考えるのである。

3. 積雪内に現われる変化の観察 実験が終ったあとで，モーターを逆転し，シャフトを上昇させて，試料の雪塊を測定器から取出す。雪塊の中央に作られた円錐形の穴の頂点を通って，鉛直に試料を切断する。切断面の一方からは，雪層の構造をあらわす着色断面を作り，他方からは，薄片製作のための小塊を切り出す。積雪の着色は200倍ほどに水で薄めたインクを，小型の噴露器で吹きかけ，あぶることによって作られる[5)]。その結果，雪層の変化の状態を観察することができる。又，積雪の薄片は，木下・若浜の方法で作られた[6)]。薄片を顕微鏡でみることによって，組織の微細な変化を観察することができる。

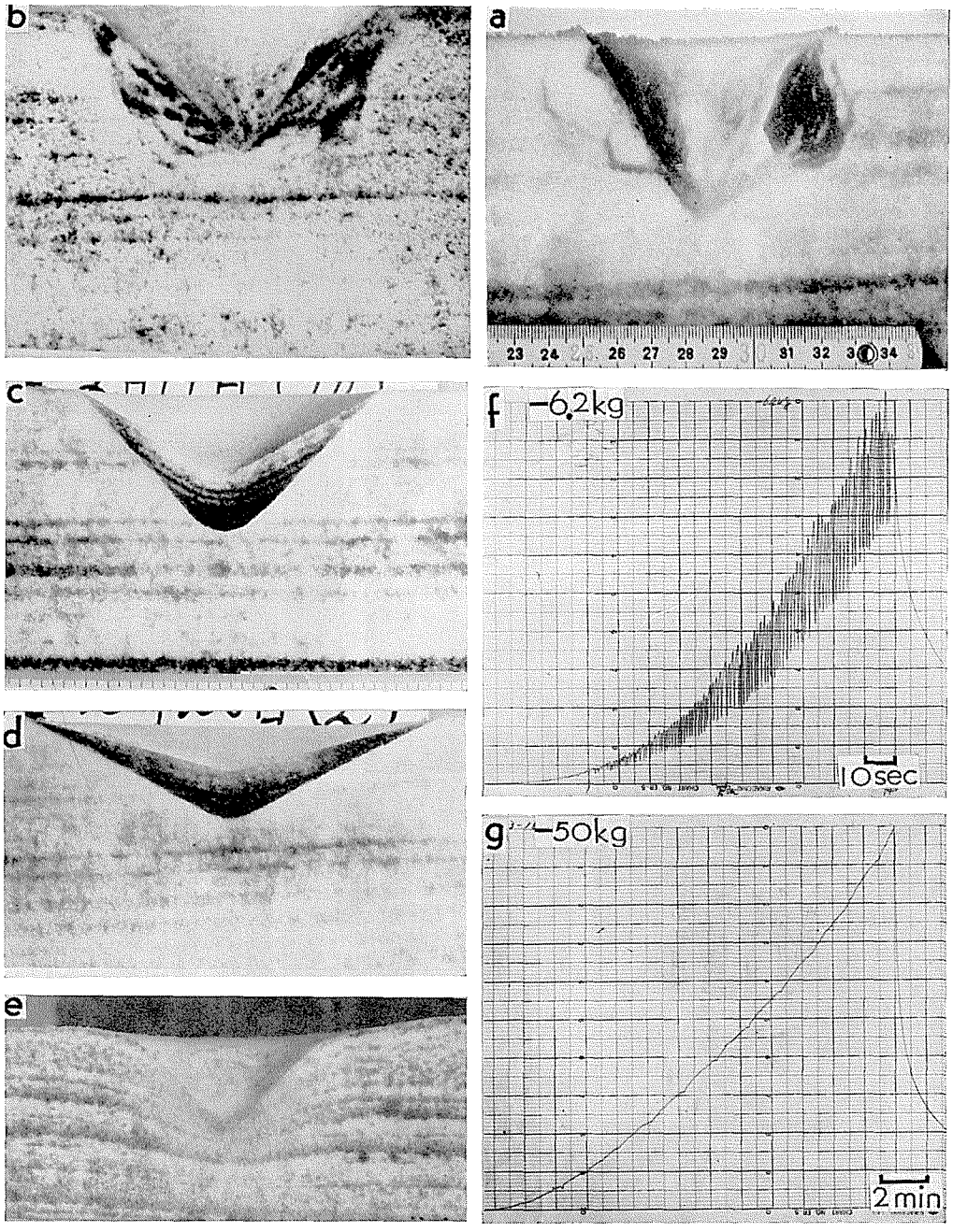
剪断変形の実験の時には，第1図**b**の写真のように，あらかじめ雪の輪の側面に縦に細いインク線を数本つけておき，これらの線の移動から，変形の様子を観察した。

III. 実験結果(その一)

これまでに行なった雪の円筒の圧縮実験においては，あるきまった速度を境にして，それ



第1図　**a** 実験装置(円錐押込み), **b** 実験装置(剪断変形), **c**, **d**, **e**, **f**, **g**, **h** 圧縮ロードセルと円錐, **c** 頂角 6°, **d** 頂角 30°, **e** 頂角 60°, **f** 頂角 90°, **g** 頂角 120°, **h** 頂角 150°



第2図 **a**, **b**, **c**, **d** 破壊変形のときの雪の鉛直断面, **a** 円錐の頂角 60°, **b** 頂角 90°, **c** 頂角 120°, **d** 頂角 150°, **e** 塑性変形のときの雪の鉛直断面, 円錐頂角 90°, **f** 破壊変形のときの力の曲線, **g** 塑性変形のときの力の曲線

よりも速度が速いと破壊が起り，遅いと塑性圧縮が起った。今回の雪のなかへ円錐を押込む実験においても，円錐の頂角が6°のするどく尖った円錐の場合を除いては，速度の違いで，変形形式に違いが現われた。それで，まずこれまでの実験で確められたことを簡単にとりまとめて述べよう。

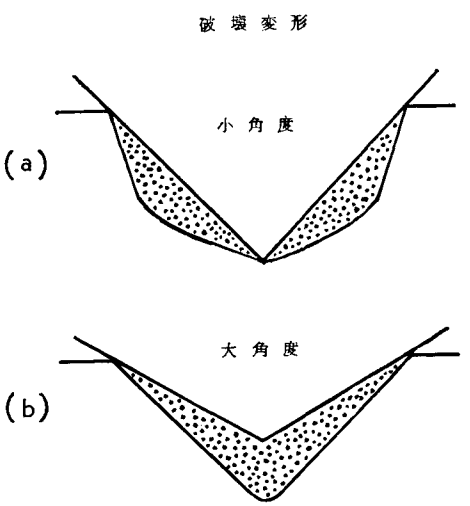
1. これまでの結果[1),2)]　雪の円筒を圧縮する場合には，圧縮速度が大きいと，雪は間歇的に破壊し，そのときの抵抗力は鋸歯の連続の形で変化する。一つの鋸歯の端で力が瞬間的にほとんど0になるが，そのときに破壊が起る。破壊は雪の円筒の上下両端面で起ることが多く，ばらばらになった雪粒は，側方へ飛び出る。しかし，まだ破壊せずに残っている円筒の部分の雪には，変化がない。圧縮速度が小さくなるに従い，次第に一回の破壊と次の破壊との間隔が長くなり力の一つの鋸歯の幅も広くなる。

圧縮速度がある限界の値よりも小さくなると，雪は破壊せず，ほぼ一様に縮む。即ち，塑性変形が起る。

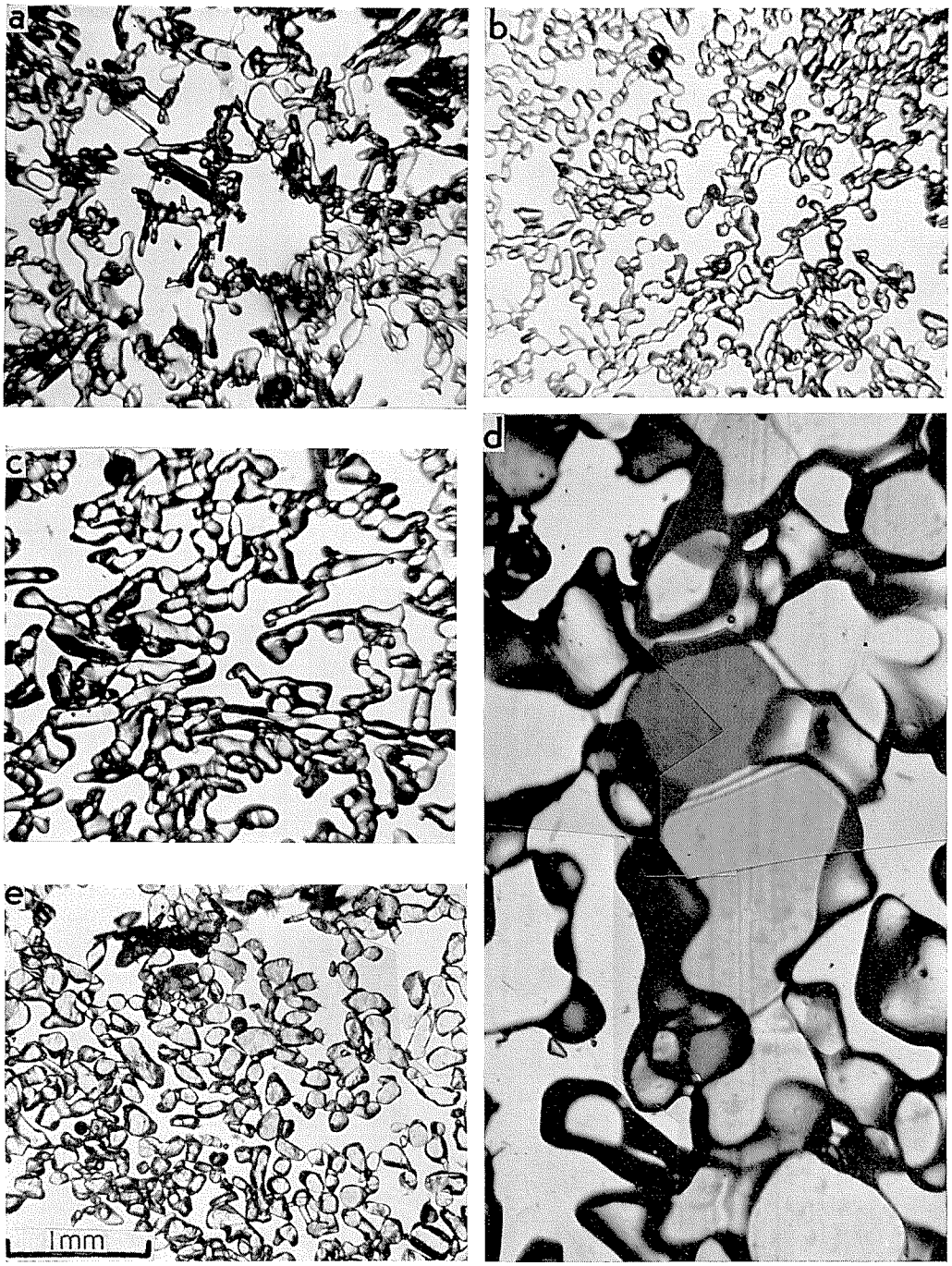
2. 破壊変形の実験例　今回の円錐押込み実験においては，頂角6°の円錐を除いて，いずれの場合もこれまでとほとんど同じことが確められた。

その若干の例を第2図の写真に示す。**a**, **b**, **c**, **d**が破壊変形が起った後の積雪の断面である。**a**が60°，**b**が90°，**c**が120°，**d**が150°の頂角の円錐の場合である。ともにしまり雪で，**a**は雪の密度$\rho=0.26$ gr/cm^3，温度$T=-3$°C，圧縮速度$v=20.5$ mm/min，最大抵抗力$F_{max}=47$ kgの場合，又，**b**は$\rho=0.19$ gr/cm^3，$T=-1.2$°C，$v=10$ mm/min，$F_{max}=28$ kgの場合，**c**は$\rho=0.26$ gr/cm^3，$T=-5$°C，$v=20.5$ mm/min，$F_{max}=82$ kgの場合，**d**は$\rho=0.25$ gr/cm^3，$T=-4$°C，$v=20.5$ mm/min，$F_{max}=99$ kgの場合である。円錐形の穴の横と下に濃く染まった部分があるが，これは破壊によって相互のつながりをたち切られ，ばらばらになった雪粒が堆積した部分である。この部分を圧縮領域と呼ぶことにする。写真から解るように，圧縮領域の外では，雪の層はまっすぐのままで変化の痕がみられない。このことは，雪の円筒の破壊変形の時に破壊しないで残った円筒の部分が，なんらの変化も示さなかったことと同じである。

3. 圧縮領域の形　圧縮領域の形は，円錐の頂角が小さいときには，第2図の**a**, **b**のように，円錐の頂点をそのまま頂点として側方に広がる。模式的に書いたのが第3図の(a)である。このような形が現われるのは，雪質，速度で多少異なるが，円錐の頂角が30°，60°，90°の場合である。頂角が大きい場合には，第3図の**c**, **d**及び第3図(b)の模式図のように，圧縮領域は，円錐の頂点よりも下に頂点がある円錐形を示す。円錐の頂角θと，圧縮領域の頂角ϕと

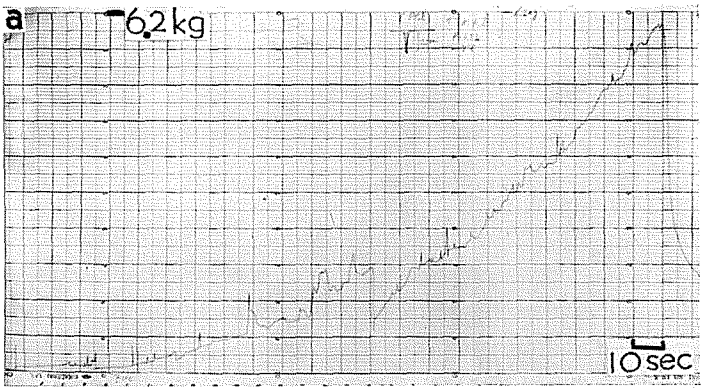


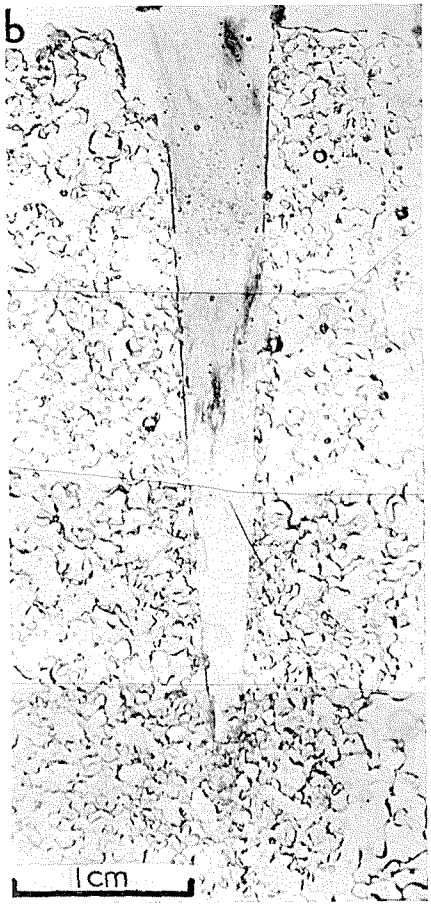
第3図　圧縮領域の模式図



第4図　雪の顕微鏡組織

a 軟かい雪(密度 $\rho=0.10$ gr/cm^3), **b** しまり雪($\rho=0.19$), **c** しまり雪($\rho=0.26$), **d** ざらめ雪($\rho=0.33$), **e** しまり雪($\rho=0.22$)の圧縮領域





第5図　頂角6°の円錐の押込み
a 力の曲線，b 薄片の接写，c 薄片の一部の拡大写真

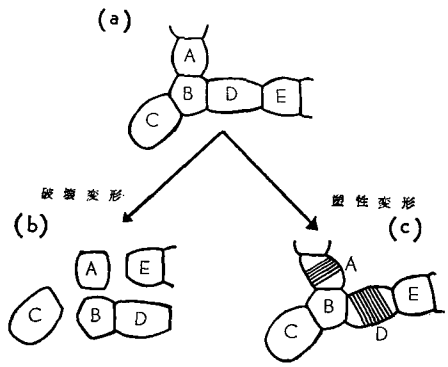
は，ほぼ次のような関係になっていた。

θ	30°	60°	90°	120°	150°
ϕ	50°	75°	110°	90°	125°

4. 破壊変形のときの力 記録の一例を，第2図の**f**に示す。雪円筒の圧縮のときと同じく，力の曲線は鋸歯状波形をとる。ただ，全体として次第に上昇する。第2図の**f**は，$\rho=0.10$ gr/cm³，$T=-2$°C の軟かい雪に，頂角 90° の円錐を $v=33$ mm/min の速度で，2分10秒間，雪面から 7.2 cm の深さまで押込んだ場合の力の曲線である。記録から認められる鋸歯の数は94ケ，つまり，94回破壊が起ったわけである。破壊の間隔は，最大5秒，最小0.4秒，平均0.5秒で，その間隔の間に円錐がめりこむ深さは，最大2 mm，最小0.16 mm，平均0.2 mmである。この雪の顕微鏡組織を第4図の**a**に示す。一つの雪粒の長さは0.1～0.5 mmである。これは，相次いで起る破壊の間に，円錐が雪の中へめり込む深さにほぼ等しい。ところで，実験後の雪の断面写真をみると，破壊は圧縮領域とその下の雪との境界面で起り，破壊した雪粒はつぎつぎに圧縮領域に繰りこまれて行くことが解る。破壊間隔についての上記のことと考えあわせると，破壊は雪粒間のつながりで起ることが想像される。

5. 破壊変形のときの組織変化 第4図の左下の**e**に，圧縮領域の薄片の写真を示す。第4図の**a**，**b**，**c**，**d**は，自然のままの雪の組織であるが，それと比べると，**e**では，多くの雪粒が相互に連結することなく，散らばっているのが目立つ。又，これを偏光顕微鏡を用いて観察すると，これらの雪粒はほとんど，それぞれ一つの色をなしている。つまり，氷の単結晶である。そして，多結晶は非常に少い。以上のことから，破壊は，網目状につながる雪粒のなかの結晶境界で起ると考えて間違いない。

6. 塑性変形の実験例 第2図の**e**は，押し込みの速度が小さく，雪のなかで塑性変形が起ったときの断面写真である（円錐頂角 $\theta=90°$，$\rho=0.1$ gr/cm³，$T=-2$°C，$v=3.4$ mm/min，$F_{max}=11.3$ kg)。この場合には，破壊変形のときにみられたような圧縮領域はみられず，雪の層は円錐によっておし曲げられ引き伸ばされた形になっている。力の曲線は，鋸歯形を示さず，時間とともにただ増大するだけである。第2図の**g**がその例である。**g**は，$\rho=0.26$ gr/cm³ のしまり雪に頂角 90° の円錐を 2.7 mm/min で 4.9 cm 押し込んだときの力の曲線である。



第6図 雪の組織変化の模式図

変形後の試料の中から薄片を作って，組織を観察すると，若浜の雪の薄片の塑性圧縮の実験[7),8)]及び筆者の雪の塑性圧縮の実験[4)]においてみられたと同じ組織の変化が観察された。すなわち，雪粒内におけるすべり，結晶の細胞化，再結晶などである。

7. 組織変化の模型化 破壊変形と塑性変形における雪の組織の変化の模様を第6図に模式図を用いて表した。上段の(a)で，A，B，C，D，Eはそれぞれ氷の単結晶であって，それらは互いに

つながって積雪を構成する。破壊変形のときには，つながりの部分の結晶境界で割れて下段の(b)のようになる。又，塑性変形のときには(c)のように，つながりの部分はそのままで，主として結晶内ですべりが起ることによって，全体が変形する。雪質に関係なく，数 mm/min の速度を境にして，この二つの変形の形式が出現するのであるが，その理由については，まだ十分な説明がつかない段階である。

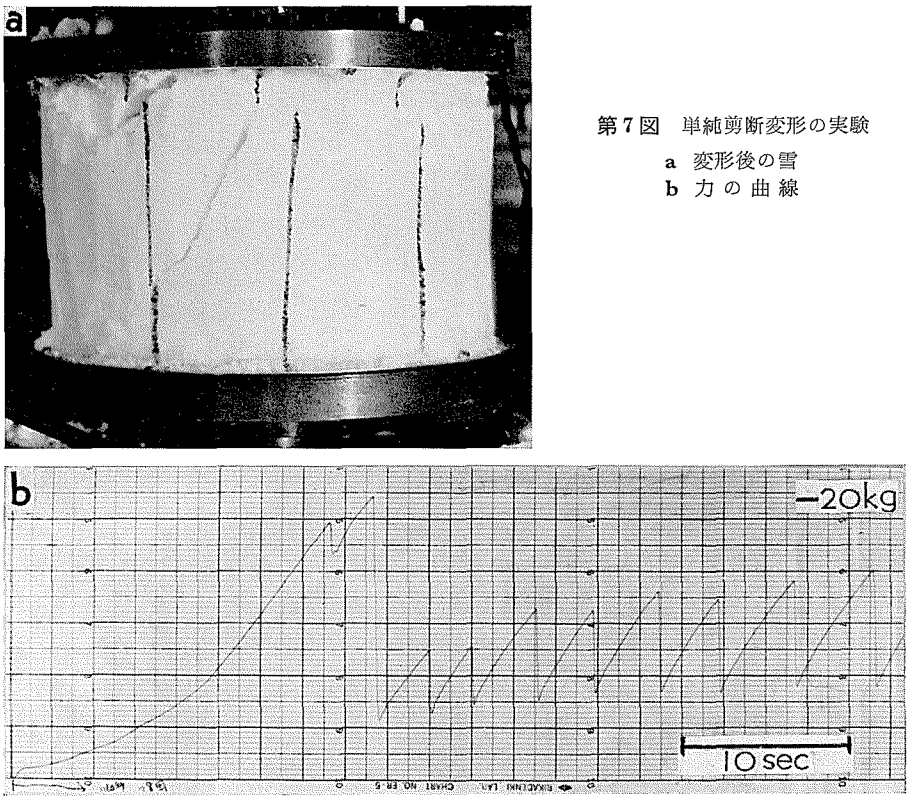
8. 応力の緩和　雪の中に円錐を数 cm 押し込んだときに，急に駆動装置のモーターをとめると，雪のなかの変形がそのときのままであるのに，力の方は急に減少する。これが粘弾性体に特有な応力緩和の現象である。第2図の **f**, **g** の力曲線で後半に急に下降する部分があるが，その部分が応力緩和の部分である。若浜によると[9]，この応力緩和も塑性変形と同じく，氷の単結晶内のすべりによって起るものである。

9. 頂角 6° の円錐　円錐の頂角が 6° の場合は，変形のしかたが例外であることを述べたが，この場合には速度の大小に拘らずこれまでのように，はっきりした破壊変形，塑性変形が現われなかった。一例を第5図に示す。この実験は密度 $\rho=0.33$ gr/cm^3，温度 $T=-7$°C のざらめ雪に頂角 6° の円錐を速度 $v=15$ mm/min で押込んだ場合である。当然破壊変形が起ることが予想される速度であるのに，この場合には特異な変化が現われた。

第5図の **a** が力の曲線，**b** が断面の薄片の接写，**c** が組織の顕微鏡写真である。**b** の接写の写真をみると，円錐に接した面がきれいに切り取られた形になっている。ところが，その一部を顕微鏡でみると，**c** のように，円錐に接した面では，雪の組織が非常に乱れている。このざらめ雪の自然の状態の組織が第4図の **d** であるが，それと比較してみると，乱れの程度がよく解る。すなわち，小さな結晶が多く，又，結晶境界が曲っている。しかし，この乱れ具合は円錐に接した面から遠ざかるにつれ，弱くなり，3 mm も離れると，ほとんど自然の状態に近い。又，力の曲線 **a** をみると，全体として上昇はしているが，ところどころに鋭い凸起がみられる。その間隔は 5～10 秒である。この間隔の間に円錐が雪の中にめりこむ深さは，1.2～1.5 mm で，これはこの雪の雪粒の大きさにほぼ相当する。このことは，円錐の頂点が雪粒にぶつかるごとに，大きな力が現われることを想像させる。これらのことは圧縮速度が速くても遅くても同じように認められた。

以上のことから，この場合の雪の組織の変化は，次のようにして起ったものと考えられる。まず，円錐頂点が雪粒にぶつかると，そこから再結晶が発生する。すなわち，小さな結晶が出現する（このことは，若浜の，氷を楔でおす実験で確められている）[10]。その後は，雪粒を作る氷の結晶内の底面すべりによって，雪粒が円錐面に接触するようになる。つまり，この場合は，変形の主体が結晶内の底面すべりである。このことは，変形速度が遅くても速くてもほぼ同じであって，前述の第5図 **b** のような結晶境界の破壊はみられなかった。しかし，実験は高々 30 mm/min までの速度で行なわれたにすぎなかったので，もっと大きな速度では，又，情況が違うかもしれない。

10. 単純剪断変形実験　単純剪断変形実験においても，速い速度では破壊変形が，遅い速度では塑性変形が現われた。実験例が少いので詳細のことは，今後の研究にまたなければな



第7図 単純剪断変形の実験
a 変形後の雪
b 力の曲線

らない。ここでは，破壊が起ったときの一例を第7図に示すにとどめる。これは密度 $\rho=0.21$ gr/cm^3，温度 $T=-3$°C，平均の剪断速度 8 mm/min の場合である。**a** は，変形後の雪の写真で，破壊は上面から 2 cm ほど下の水平面と中央から左下に斜めに走る割れ目の面とで起っている。つまり，最大剪断応力及び最大張力の作用する面にそって破壊が起きている。**b** は，そのときの力の曲線で，鋸歯状を示す。

以上，実験結果を綜合して，概括的なことを述べた。測定値の数量的な検討は次節以下において取扱う。

なお，得られた結果の一覧を第1表に示す。この表のやわらかい雪 (1) の顕微鏡組織は第4図の **a** である。又，やわらかい雪 (3)，しまり雪 (1)，硬いざらめ雪の顕微鏡組織は，それぞれ第4図の **b**，**c**，**d** である。硬いざらめ雪は，自然の状態で，かなりぬれたざらめ雪を低温室に持ちこんで凍らせたものである。

第　1　表

a　やわらかい雪 (1)

密度 (gr/cm³)	温度 (℃)	硬度 (gr.wt/cm²)	円錐角度 (°)	速度 (mm/min)	変形形式	押込み深さ (cm)	最大力 (kg)	破壊回数 (回)	破壊時間間隔 t 最大 (秒)	平均 (秒)	最小 (秒)	t の間に進んだ距離 最大 (mm)	平均 (mm)	最小 (mm)	応力の緩和 $\frac{1}{2}$になる時間(秒)	1分後の割合(%)
0.10～0.12	−4.5	30	30	2		5	0.77									65
〃	〃	〃	〃	24	破壊	6.5	0.71	55	5	1.4	1	2	0.56	0.4	45	48
〃	−3	25	60	〃	破壊	5.3	1.1	65	〃	0.9	0.6	〃	0.36	0.24	28	39
〃	−1～−2	20	90	3.4	塑性	6	10.7								18	25
〃	〃	〃	〃	33	破壊	7.2	6.3	94	〃	1	0.8	2.8	0.55	0.44	8	14
〃	−3	25	120	24	破壊	5.5	5.3	181	〃	0.5	0.4	2	0.2	0.16	53	48

b　やわらかい雪 (2)

0.13	−0.2		30	10	破→塑	8	4.2	5	141	60	23	23.5	10	3.8	23	32
〃	〃		〃	〃	破→塑	〃	6.5	7	96	37	20	16	6.2	3.3	22	26
〃	−2		〃	〃	破壊	7.4	4.7									
〃	−0.8		〃	〃	破壊	8	4.9	13	93	28	2	15.5	4.7	0.33	18	28
〃	−0.5		〃	24	破壊	7.2	2.6								14	30
〃	−1		60	10	破壊	7.5	8.5	130	5	3	1.7	0.83	0.5	0.28	150	63
〃	〃		〃	24	破壊	7.2	6.7	193	1.2	0.6	0.4	0.48	0.24	0.16	13	29
〃	〃		90	10	破壊	8	10.5	164	7	2.6	1.7	1.2	0.43	0.28	32	39
〃	−0.5		〃	24	破壊	6	8.4	43	5	1.7	0.8	2	0.68	0.32	36	44
〃	−1		円板†	33	破壊	5.7	6.4	110	2	0.8	0.4	1.1	0.44	0.22	7	14
〃	−6		剪断	26	破壊	2.8*	0.029**	128	10	0.6	0.2	0.43	0.26	0.09	100	57

c　やわらかい雪 (3)

0.20	−0.5	150	6	7		7	1.6								10	28
0.19	−3		30	3.4	塑性	6.8	7.9								45	46
0.20	−1	150	〃	7	塑性	5.7	6.4								19	30
0.19	−2		〃	10	破壊	5	9.3								15	28
〃	〃		60	3.4	塑性	5.1	14.3								30	40
〃	−2		〃	〃	塑性	6.8	18.3								25	35
0.20	−1	150	〃	7	塑性	5.7	21.6								20	35
0.19	−2.5		〃	10	破→塑	5	29.4	43	4	2	1.4	0.66	0.33	0.23	11	27

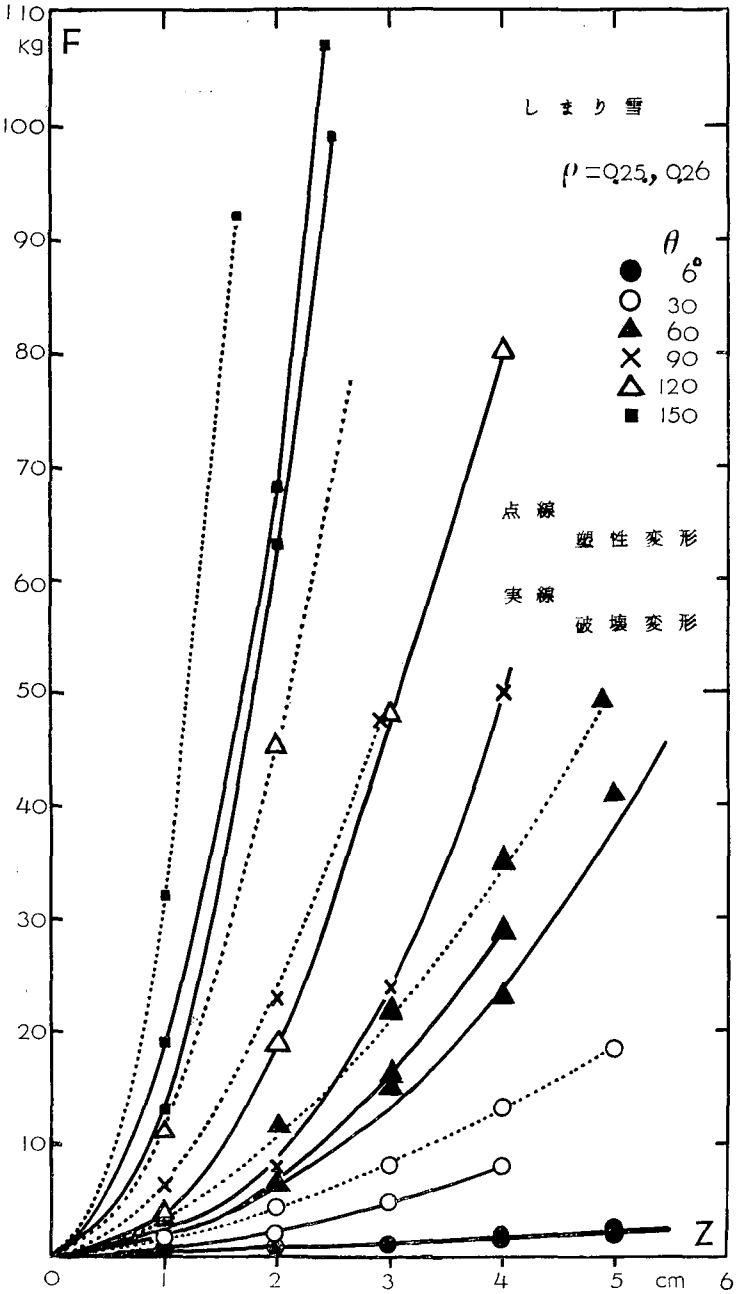
† 直径 10 cm,　* 雪の輪の上面の変位,　** 雪の輪の上面における剪断応力の最大値 kg/cm²

密度 (gr/cm³)	温度 (°C)	硬度 (gr.wt/cm²)	円錐角度 (°)	速度 (mm/min)	変形形式	押込み深さ (cm)	最大力 (kg)	破壊回数 (回)	破壊時間間隔 t 最大 (秒)	平均 (秒)	最小 (秒)	t の間に進んだ距離 最大 (mm)	平均 (mm)	最小 (mm)	応力の緩和 $\frac{1}{2}$になる時間(秒)	1分後の割合(%)
0.22	−4	250	90	0.7	塑性	3.5	37								45	46
0.19	−3		〃	3.4	塑性	6.8	43								30	37
〃	−1.2		〃	10	破壊	5	28	140	3	2	1.4	0.5	0.33	0.23	24	34
0.22	−4	250	〃	20.5	破壊	6.1	60	217	1	0.7	0.5	0.34	0.24	0.17	16	32
0.21	−2		剪断	1.2	破→塑	1.8*	0.064**								70	53
〃	−3		〃	8	破壊	1.9*	0.059**	28	22	5	2.5	3.0	0.68	0.34	120	66
d しまり雪 (1)																
0.25	−5	500	6	2.7		5.5	2.2								40	45
〃	〃	〃	〃	20.5		5	2.4								5	26
〃	−4.5	〃	30	2.7	塑性	5.1	19.2								16	30
〃	−4	〃	〃	20.5	破壊	4	8	32	4.3	2.3	0.8	1.5	0.78	02.7	7	26
0.26	−3	〃	60	2.7	塑性	4.9	49.5								15	30
〃	〃	〃	〃	20.5	破壊	5.5	45	228	2	0.6	0.3	0.68	0.21	0.10	18	36
〃	〃	〃	〃	〃	破壊	4	29	148	1	0.6	0.3	0.34	0.21	0.10	6	22
〃	〃	〃	90	2.7	塑性	2.9	47.5								18	32
〃	〃	〃	〃	20.5	破壊	4	52	236	0.6	0.3	0.2	0.21	0.10	0.07	18	35
0.25	−4.6	〃	120	2.7	塑性	2.7	78								24	36
〃	−5	〃	〃	20.5	破壊	4	80	259	0.75	0.33	0.15	0.26	0.11	0.05	40	44
〃	−4	〃	150	2.7	塑性	1.6	92								25	37
〃	〃	〃	〃	20.5	破壊	2.5	99	163	1	0.38	0.15	0.34	0.13	0.05		
〃	〃	〃	〃	〃	破壊	2.4	107	152	0.62	0.3	0.18	0.21	0.10	0.06	25	38
〃	−0.6	〃	円板†	〃	破壊	1.7	79	85	1.4	0.4	0.25	0.48	0.14	0.09	5	21
〃	−3.7	〃	〃	〃	破壊	4.6	103	170	1.25	0.4	0.18	0.35	0.14	0.06	25	38
0.26	−6	〃	剪断	4.5	破壊	2.4*	0.29**			45		3.4			280	72
0.27	〃	〃	〃	〃	破壊	2.6*	0.38**	3	195	99	39	14.6	7.4	2.8	180	65
e しまり雪 (2)																
0.37	−1		30	4.5	塑性	3.4	41								8	21
0.35	−0.7		〃	20.5	破壊	2.4	19								4.2	14
0.38	−1		60	4.5	塑性	3.7	98								9	22
0.36	〃		〃	〃	塑性	5.3	99								13	27

0.39	−1		60	4.5	塑 性	3.6	102								9	24
0.37	−0.7		〃	〃	塑 性	3	99.5								12	26
0.36	−1		〃	20.5	破 壊	3.5	52		3	2.3	2	1	0.8	0.7	3.5	20
〃	〃		〃	〃	破 壊	3	48								3.5	16
0.38	−0.5		〃	〃	破 壊	3.3	87								3	15.5
〃	−1		90	4.5	塑 性	2.3	99								11	28
〃	〃		〃	〃	塑 性	3.7	205								15	33
0.39	−0.7		〃	〃	塑 性	3.8	180								13	27
0.37	−1		〃	20.5	破 壊	2.5	91								2.8	15
0.38	−0.5		〃	〃	破 壊	4.35	194								3.8	16
f 硬いさらめ雪																
0.34	−5		6	20.5		4.7	14.3								12	31
0.32	−7	1700～2600	〃	2.2		5	5.8								2	30
0.34	−5		〃	3.9		7.4	7.4								9	25
0.32	−7	1700～2600	〃	14.7		5.5	6								2	11
0.34	−5		〃	20.5		6	6.1								2.8	13
0.32	−7	1700～2600	30	2.2	塑 性	3.7	25.4								15	24
0.34	−5		〃	3.9	塑 性	5.1	11.9								17	33
0.32	−7	1700～2600	〃	14.5	破 壊	4.5	10	90	2.5	1.8	0.8	0.6	0.44	0.19		
0.35	−5		〃	20.5	破 壊	4.7	7								5	22
0.32	−10	1700～2600	〃	23.6	破 壊	4.5	8.5	75		0.6			0.24		3	14
0.37	−5		60	3.9	塑 性	2.4	49								4	16
0.32	−7	1700～2600	〃	14.7	破 壊	3	18		1	0.65	0.4	0.24	0.16	0.10	5	18
0.37	−5		〃	20.5	破 壊	3.4	51								4.5	18
0.32	−7	1700～2600	90	14.7	破 壊	2.5	43		1.2	1	0.8	0.29	0.24	0.20	5	19
〃	〃	〃	120	14.4	破 壊	2	160	80	5	1.1	0.4	1.2	0.26	0.10	8	27
〃	〃	〃	150	14.7	破 壊	1.8	51	120	1	0.6	0.4	0.24	0.15	0.10	14	32
g ぬれさらめ雪																
		含 水 率														
0.43	0	16%	30	20.5	破 壊	7.2	5.6								100	55
〃	〃	〃	60	〃	破 壊	6.7	20								10	27
〃	〃	〃	90	〃	破 壊	6.0	49								13	31

IV. 実験結果(その二)

第1表に示すように，実験は7種類の雪質について行なわれた。ここで実験結果を数量的に取まとめ，その整理をしよう。



第8図　円錐にかかる力 F と円錐頂点の雪面からの深さ Z との関係

まず，円錐がうける力Fと，円錐の頂点の雪面からの深さZとの関係を，それぞれの実験で得られた力の曲線からぬき出してグラフにした。第8図にその一例を示す。このグラフは第1表のしまり雪(1)について書かれたものである。円錐の頂角に応じて印をかえてある。同じ印を結ぶ曲線のうちで，実線が破壊変形，点線が塑性変形の場合である。前節で述べたように破壊変形のときには，力は鋸歯の連続の形で変化する。グラフは，それらの鋸歯の頂点を結ぶ曲線から得られたものである。円筒の圧縮実験のときと同じく，塑性変形の場合の方が破壊変形の場合よりも，力が大きい。力Fは，深さZがますほど，又，円錐の頂角θが大きいほど，大きい。他の雪についても，その傾向は同じであった。FとZの関係を数値的に検討してみよう。

円錐が雪に接触する面積Sは，頂点の雪面からの深さZの2乗に比例する。すなわち，頂角をθとすると

$$S = \pi \tan\frac{\theta}{2} \sec\frac{\theta}{2} Z^2 \qquad (1)$$

である。円錐が雪からうける力は，円錐と雪との接触面を通してであるから，力Fも深さZに対しては，(1)式と同じような関係にあることが想像される。事実，第8図のグラフから，Fが

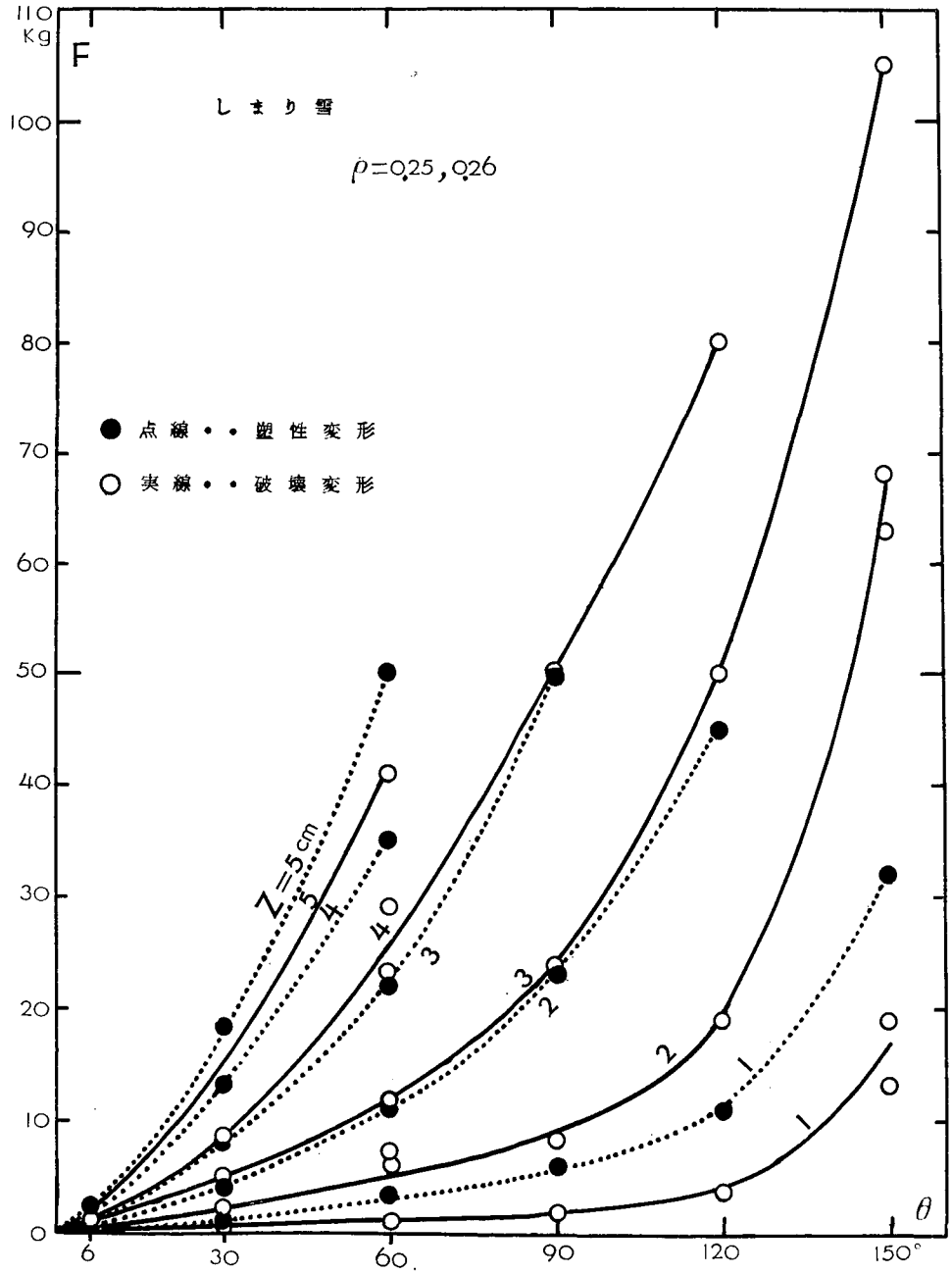
第2表　$a\left(=\frac{F}{Z^2}\right)$の値 (kg/cm²)

雪質 第1表の		円錐頂角 6°	30°	60°	90°	120°	150°
(a)	破壊変形		0.016	0.036	0.10	0.17	
	塑性変形		0.03		0.25		
(b)	破壊変形		0.07	0.13	0.33		
	塑性変形						
(c)	破壊変形						
	塑性変形	0.033	0.18	0.42, 0.55	1.0		
(d)	破壊変形	0.1	0.5	1.5	3	5	18
	塑性変形	0.1	0.9	2.2	5.4	11	36
(e)	破壊変形		3.2	4.0, 5.3, 7.8			
	塑性変形		3.7	3.5, 7.6, 8.4 11	13 , 17		
(f)	破壊変形	0.16, 0.25 0.65	0.4, 0.6, 0.7	2, 4.5	7	4.5	15
	塑性変形		0.6, 1.8	9.0			
(g)	破壊変形		0.104	0.46	1.4		
円錐と雪との接触面積 S		0.165	0.89	2.1	4.5	11	$45\times Z^2$
圧縮領域の面積 S'			1.6	2.6	5.7	13.4	$49\times Z^2$

Zの2乗にほぼ比例することが解る。その関係を

$$F = aZ^2 \qquad (2)$$

で表して，実験結果から計算した比例常数 a の値を第2表に示す。



第9図　円錐にかかる力 F と円錐頂角 θ との関係

a の値は，頂角 θ がますとともに，ますけれども，そのまし方は円錐と雪との接触面積 S の θ に対するまし方よりも，かなり小さい。

つぎに，円錐の頂角が大きいほど，雪の抵抗力 F は大きい。その関係を第8図と同じしまり雪について第9図に示す。この図では雪面からの頂点の深さ Z が1，2，3，4，5 cm のときの力 F の値を取出して示してある。破壊変形の場合も，塑性変形の場合も，ともに，ほぼ次の関係が成り立つ

$$F \propto \theta^{1.67} \tag{3}$$

しまり雪では，同じ頂角の円錐で，同じ深さだけ雪の中にめり込んだ場合に現われる力 F は，密度 ρ が大きいほど，大きい。その関係を調べたところ，破壊変形の場合も塑性変形の場も，ともに F と ρ との間には，次の関係が成り立っていた。

$$F \propto \rho^3 \tag{4}$$

この関係は，これまでの実験において得られた関係とほぼ同じである[2),4),11)]。

以上の結果を綜合して，今回の実験では，しまり雪について，力 F kg と，頂点の雪面からの深さ Z cm，頂角 $\theta°$，雪の密度 ρ gr/cm^3 との間に，ほぼ次の関係が成り立つことが解った。すなわち

破壊変形の場合は

$$F = 7\rho^3\theta^{1.67}Z^2 \tag{5}$$

塑性変形の場合は

$$F = 14\rho^3\theta^{1.67}Z^2 \tag{6}$$

である。

V. 考　　察

破壊変形のときには，相互のつながりを断ち切られた雪粒は，円錐の下につめられて，圧縮領域を形成する。この圧縮領域は，円錐が下降するにつれ，相似形のままで拡大して行く。密度が 0.3 gr/cm^3 位までの雪では，圧縮領域の密度は，大体もとの密度の2倍を保ち，圧縮が進行しても終始変らない。それで，圧縮領域を剛体のように考え，圧縮領域とその下の雪との境界面(面積 S')に一様に鉛直下向きの力 p が単位面積ごとに作用すると仮定する。面積 S' と，円錐の頂角 θ，圧縮領域の頂角 ϕ との間には，先の第3図の(b)のような場合に，

$$S' = \pi \operatorname{cosec}\frac{\phi}{2} \tan^2\frac{\theta}{2} Z^2 \tag{7}$$

なる関係がある。又，第3図の(a)のような場合でも，断面の写真から，S' と Z との関係を求めてみると，やはり S' は Z の2乗に比例している。その比例常数 b を，先の第2表の最下列に示した。したがって

$$F = pbZ^2 \tag{8}$$

である。

破壊変形の場合について，実験結果から求めた $\frac{F}{Z^2}=a$ の値と，この b の値とを比べると，同じ頂角 θ について，ほぼ比例していると考えてよいであろう。したがって，p が頂角 θ について余り変らないことになる。その値を第3表に示す。

圧縮領域とその下の雪との境界にそっては，垂直応力 $\sigma=p\sin\frac{\phi}{2}$，剪断応力 $\tau=p\cos\frac{\phi}{2}$ が作用する。円錐の頂角が小さいほど，剪断応力の方が垂直応力よりも大きい。したがって，こわれた雪粒は，この面にそって上方に流動しやすい。頂角が小さいときに，先の第3図(a)のように，圧縮領域の頂点が，円錐の頂点よりも下にならなかったのは，このためであろう。

雪のなかに平板を押込むときには，板を通して雪には垂直応力 σ' だけが働く。又，単純剪断実験のときには，鉄の板を通して，雪には剪断応力 τ' だけが働く。その意味で，第3表に σ' と τ' を書きそえた。p の値に比べると，σ' は大きく，τ' は小さい。一般にもろい物質が破壊するときには，圧縮変形のときの圧縮応力 (σ') よりも，剪断変形のときの剪断応力 (τ') の方が小さい。雪についても，同じことが確められたわけである。

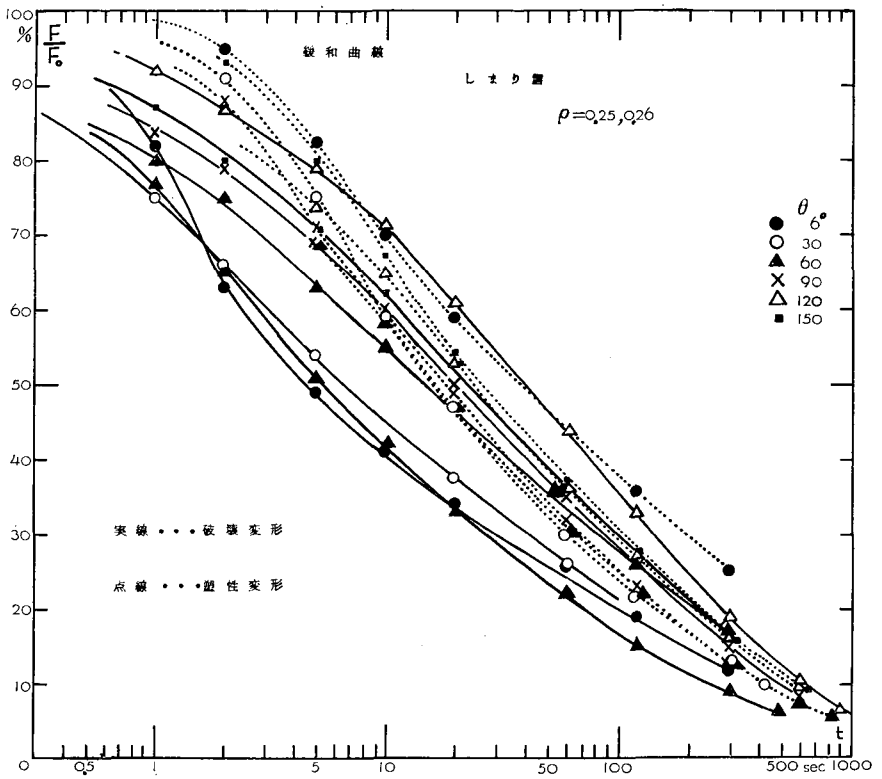
第3表 p, σ', τ' の値 (kg/cm²)

雪質第1表の	円錐頂角 6°	30°	60°	90°	120°	150°	平板押込み (σ')	単純剪断変形 (τ')
a 軟かい雪		0.01	0.014	0.018	0.011		0.036	
b 軟かい雪		0.032 0.042	0.046	0.042 0.058			0.082	0.029
c 軟かい雪	0.033	0.23 0.26		0.19 0.23				0.059
d しまり雪	0.36	0.31	0.5	0.53	0.37	0.38	1.3 1	0.29 0.38

塑性変形の場合には，円錐と雪との接触面に働く応力を見つけることは難しい。それで，いわゆる粘弾性体における抵抗力の考えを応用して，円錐にかかる力 F の時間的変化を求めてみた。

第 **III** 節で述べた応力緩和の現象は，雪が粘弾性体であることを示す証拠である。変形を止めてからの力 F の減少のしかたを，第1表の最右列に示しておいた。ここでは，第1表 c のしまり雪の場合だけについて，緩和曲線を示す。第10図がそれである。曲線群はある幅をもって分布してはいるが，ほぼ平行である。すなわち，はじめの減少のしかたには差があるが，しばらくたつと大体同じような減少をする。そして，円錐の頂角の大きさにはほとんど関係がない。緩和は，結晶内の底面すべりによって起るのであるから[9]，もはや変形の進行しない段階では，円錐の形には無関係な筈である。一般的な傾向として，緩和のしかたは，変形に要した時間が長いほど遅く[3]，又，破壊変形よりも塑性変形の方が遅い。

緩和曲線をまとめて実験式で表すと



第10図　緩和曲線，F_0 は変形をとめたときの力

$$\frac{F}{F_0} = (ct+1)^{-\frac{1}{2}} \tag{9}$$

のようになる。ここで，時間 t は秒で表されている。又，常数 c は 0.05 と 0.5 の間である。

粘弾性体の抵抗力 F は，一般に次の式で表される。

$$F(t) = E\varepsilon(t) - \int_0^t f(t-t')E\varepsilon(t')dt \tag{10}$$

第1項は歪に比例する弾性の項で，第2項は，ある割合で時間とともに力が減少することを示す項である。減少の程度を指示する函数 $f(x)$ が，余効函数と呼ばれるものである。この実験における塑性変形では，この(10)式のように，力 F が変化する筈である。

緩和曲線の式(9)を考慮に入れると

$$f(x) = -\frac{1}{2}c(cx+1)^{-\frac{3}{2}} \tag{11}$$

になる。又，歪 $\varepsilon(t)$ に比例する弾性的な力は，この実験のような円錐押込には，雪面からの深さ Z の2乗に比例するとしてよい。又，定速度の押込みであることを考えて，$E\varepsilon(t)=kt^2$ とおくと，

$$F(t)=\frac{8}{3c^2}k\left\{(ct+1)^{\frac{3}{2}}ct-1\right\} \tag{12}$$

が得られる。kは，速度，円錐頂角，雪質に関係する常数である。(12) 式は時間 t が小さいときには，$F(t)\approx kt^2$ である。そして，時間がたつにつれ，力 F は時間 t の 2 乗からずれて行く。すなわち，塑性変形のときの力は，はじめは，円錐頂点の雪面からの深さ Z の 2 乗に比例するけれども，やがて次第にその関係からずれて行く。したがって，先の実験式 (6) も Z が大きいところでは，適用できない。

終りに，この実験に際して有益な助言をいただいた吉田順五教授に厚く感謝の意を表します。又，この実験は，主として新潟県塩沢町の国鉄雪実験所の低温室において行なわれたもので，種々御便宜を計っていただいた実験所長荘田幹夫博士に厚く感謝の意を表します。又，低温科学研究所若浜五郎助教授，中村勉助手，及び雪実験所の遠藤徹氏他所員の皆様には，実験に際し色々と御助力をいただいた。厚くお礼を申し上げる次第である。

文　　献

1) 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***，139–166.
2) 木下誠一 1958 積雪における変形速度と変形形式との関係 II. 低温科学，物理篇，***17***，11–30.
3) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学，物理篇，***19***，135–146.
4) 木下誠一 1962 塑性圧縮による積雪の氷への転化. 低温科学，物理篇，***20***，131–157.
5) 藤岡敏夫 1961 積雪観測法 I. 雪氷，***23***，179–183.
6) 木下誠一・若浜五郎 1959 アニリン固定法による積雪の薄片. 低温科学，物理篇，***18***，77–96.
7) 若浜五郎 1960 積雪の薄片を応用した積雪の組織と内部歪の研究 I. 静荷重による積雪薄片の圧縮. 低温科学，物理篇，***19***，37–72.
8) 若浜五郎 1960 積雪の薄片を応用した積雪の組織と内部歪の研究 II. 積雪薄片の定速度圧縮. 低温科学，物理篇，***19***，73–96.
9) 若浜五郎 1962 氷の塑性変形について III. 氷の応力緩和. 低温科学，物理篇，***20***，101–116.
10) 若浜五郎 未発表 氷の塑性変形について VI.
11) 木下誠一 1960 積雪の硬度 I. 低温科学，物理篇，***19***，119–134.

Summary

A rigid cone was intruded into snow at a constant speeds of 1～30 mm/min. The apex angles of the cones were 6, 30, 60, 90, 120 and 150°. With the exception of the 6° cone, above a certain critical speed, the snow deformed destructively, and below it plastically. With destructive deformation, break down occurred intermittently along the grain boundaries of the ice grains composing the snow. The broken ice grains were packed into the compressed region beside or under the cone (Fig. 2, **a**, **b**, **c**, **d** and Fig. 4, **e**). The amount of resistance increased rapidly, presenting a saw-toothed curve (Fig. 2, **f**). With plastic deformation, the horizontal layers of the snow lengthened and bent, as is shown in **e** of fig. 2, and most of the ice grains in the snow near the cone underwent basal slip. The amount of resistance increased without any discontinuity (Fig. 2, **g**).

When the 6° cone was intruded into the snow, the amount of resistance increased with occasional sharp peaks (Fig. 5, **a**). As is shown in the photograph of the thin section (Fig. 5, **b**), the ice grains appeared as if they had been cut off with a sharp-edged razor. Microscopic observations (Fig. 5, **c**) indicated that, as the apex of the cone touched each ice grain, the resisting force increased sharply, and recrystallization originated from this contact point, and then the ice grains contacted the cone by basal slip.

From these results, the following relations between the force F kg, the vertical angle of the cone $\theta°$, the snow density ρ gr/cm^3 and the subsiding distance of the apex of cone under the snow surface Z cm were obtained.

For destructive deformation $F=7\ \theta^{1.67}\rho^3 Z^2$.
For plastic deformation $F=14\ \theta^{1.67}\rho^3 Z^2$.

低温科学　物理篇　第23輯　訂正

頁	行	誤	正
17	1	1964	1965
67	1	1964	1965
99	2	adn	and
〃	2	1964	1965
121	1	1964	1965
129	2	1964	1965

低温科学　物理篇　第25輯　訂正

頁	行	誤	正
37	脚　註	第841号	第837号
187	5	できる。	できまる。
197	4	ヒマヤラの	ヒマラヤの
198	下から2	Socilty	Society
215	17	などを得て	などを経て
225	9	重量，凍上との	重量，凍土との
229	7	粒土分布	粒度分布

付　　録

v	積雪分科会の著者	Dumani	Doumani
vii	氷分科会-1の座長	Bonson	Benson
ix	氷分科会の座長	L. Levi	C. S. Benson
xi	名簿，8人目	*●新井	●新井
xiii	同，下から6人目	●石原	石原
xiv	同，11人目	●小泉	小泉
xviii	下から9行目	Hanovr	Hanover

viii	上から2行目	Luyet, B. J. の講演は前頁，氷分科会-2の同氏の講演に引続き行なわれた。	