



Title	積雪円柱の圧縮破壊
Author(s)	遠藤, 八十一; ENDO, Yasoichi
Citation	低温科学. 物理篇, 25, 63-72
Issue Date	1967-12-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18061
Type	departmental bulletin paper
File Information	25_p63-72.pdf



積雪円柱の圧縮破壊*

遠藤 八十一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和42年8月受理)

I. ま え が き

積雪の円柱を圧縮するとき、円柱が受ける変形の形式は圧縮の速度によっていろいろ変る。これについては、既に木下^{1,2,3)}が多くの研究を行なった。木下によれば、

1) 圧縮速度 v がある限界速度 v^* を越えないあいだは、積雪の円柱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、圧縮板が雪粒の大きさ程度進む毎に、円柱の端面に破壊が起こる。即ち、積雪は間歇的に破壊されながら丈を縮める。これを破壊変形と呼ぶ。

3) 限界速度 v^* は、温度によって変るが、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。

圧縮速度 v 及び限界速度 v^* は、圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ (圧縮速度 v を積雪円柱の高さ h で割ったもの) ではない。圧縮板の降下速度である。

破壊変形と塑性変形との境界が、圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ でなく、圧縮板の降下速度 v によって決まるとするのが木下の結果である。しかし、これは理解しにくいことがらである。塑性変形にせよ、破壊変形にせよ、いずれも応力によって起こるはずである。そして、応力は圧縮速度 v ではなく圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ できまる。それゆえ、塑性変形と破壊変形との境界を定めるものも v ではなく $\dot{\epsilon}$ のある値になるはずである。この点を明らかにする目的で、高さ h の異なる多くの積雪円柱を圧縮する実験をおこなった。圧縮速度 v が同じでも、積雪円柱の高さ h が異なれば、圧縮歪速度は変わる。それゆえ、限界速度 v^* が h によって変るか変らないかを調べることによって、上の疑問の解決に対するきっかけがえられるであろう。

II. 実験方法

実験は低温実験室でおこなった。積雪の円柱をロードセルの上ののせ、上から圧縮板を一定速度で下降させて円柱を圧縮した。圧縮板は、2個の減速装置を介して、モーターによって下降させた。圧縮の進行にともなって積雪の円柱が示す反力は、ロードセルを介して、電気的に記録した。

圧縮板の下降は、29~37 mm/min の範囲の速度でおこなった。木下によれば、この範囲

* 北海道大学低温科学研究所業績 第838号

の圧縮速度では、積雪は破壊変形を起こすはずである。

雪の試料には、全て積雪層に平行に切取った雪の円柱を用いた。積雪円柱の直径は、6 cm である。しかし、稀に 9 cm の径の円柱も用いた。

積雪円柱の圧縮を終えた後では、必ず積雪円柱を縦に切断し、インクをとかした色水を吹きかけ、その染まりぐあいから、雪の変形の様子を検討した。

温度は $-5\sim-11^{\circ}\text{C}$ の範囲に限定した。

III. 破壊形式の観察と分類

木下も注意したように、破壊圧縮における積雪円柱の破壊のしかたは一通りではない。それで、破壊の有様を詳しく観察し、破壊様式の分類を試みた。破壊実験は全て、温度 $-5\sim-11^{\circ}\text{C}$ で、 $29\sim 37\text{ mm/min}$ の範囲の圧縮速度でおこなった。試料の高さ h と密度 ρ をいろいろ変えて、次のような 5 種類の破壊形式を定めることができた。

1. 粉碎圧密型
2. 縦われ型
3. 欠けおち型
4. 横われ型
5. 内部破壊型

ただし、これらの異なる破壊は、それぞれが単独に起こるのではない。第一の粉碎圧密型は非常に普遍的で、ほとんどすべての破壊変形において見られる。他の型のものは、粉碎圧密型破壊とともに起こる。

1. 粉碎圧密型破壊

粉碎圧密型破壊については、木下が既に詳しく報告しているが、ここに筆者の所見も加えて、あらためて説明する。積雪円柱の一軸圧縮変形における破壊は、一般に雪の円柱の上又は下の端面で、音を伴って起こる。柱の端面の縁からは、粉碎された雪粒が勢いよく飛びだし、一時休止したのちまた飛びだす。このような破壊が繰返されてゆくのが粉碎圧密型破壊である。

粉碎圧密型破壊変形を受けた積雪円柱を、縦に切断し、色水を散布すると、断面は図版 I-1 の写真のように染まる。図版 I-2 は濃く染まる部分の境界付近から切り出した雪の薄片の顕微鏡写真である。図版 I-2 の上半分が図版 I-1 のインクに染った部、下半分がそのまわりの白い部分に相当する。インクに濃く染まる部分には、小さな氷粒が沢山つまっている。この氷粒は破壊圧縮によって相互のつながりを断切られ、ばらばらになった雪粒である。この小さな氷粒が詰めこまれたインクに濃く染まる部分を圧密部分と呼ぶことにする。図版 I-1 の円柱の肩がそげているのは、破壊圧縮の過程で欠けおちたためである。

圧密部分の形には、破壊の起こった円柱端面を底面とする円錐、截頭円錐、半球等の形がある。しかし、これらのものの中間形もあるので、常に上の三種類に分類できるとは限らない。

2. 縦われ型破壊

この破壊も積雪円柱の上又は下の端面で粉碎圧密型破壊としてはじまる。しかし、端面での碎壊は数回で終り、円柱は縦にわれる。図版 I-3 は、縦われ型の破壊を起こした円柱である。縦われ型破壊を起こした積雪円柱には、圧密部分はほとんど存在しない。

3. 欠けおち型破壊

縦われ型破壊と同じように、積雪円柱の上又は下の端面で数回破壊したのち、円柱側面が図版 I-4 のように欠けおちる。このような破壊を欠けおち型破壊と名づける。圧密部分は、縦われ型破壊の場合と同様に、ほとんど存在しない。

4. 横われ型破壊

最初は円柱端面で間歇的な破壊が起こる。しばらくして、破壊面は円柱内部に移り、そこで間歇的破壊が始まる。破壊面からは破壊のたびに雪粒が飛出す。破壊面は、円柱の軸と直角又はそれに近い角度で交わっている。この円柱を縦に切断し、色水を散布したのが図版 I-5 である。円柱の下面から少しあがった所にできた破壊面がインクに濃く染まっている。図版 I-6 は破壊面付近から切出した薄片の顕微鏡写真である。粉碎圧密型破壊の圧密部分と同じように、相互のつながりを断切られた雪粒がつまっている。

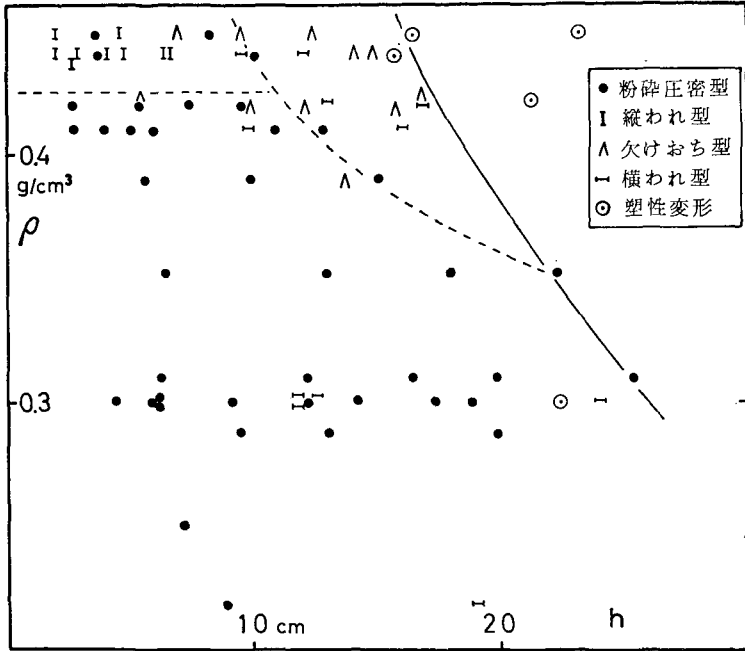
5. 内部破壊型破壊

上に述べた4つの破壊形式の分類は、主に外側からの観察によった。しかし、外側からは全く観察できない破壊が積雪円柱の内部に起こっていることがある。図版 I-7 が、この内部破壊を起こした円柱の断面に色水を散布した写真である。柱の中央を横断して横われ型の破壊面がみられるが、横われ型破壊面の上に、色水に染まった不規則な形の線分 A が3本ある。これが内部破壊を起こした箇所である。線分 A の両端は柱の内部にあるので、この種の破壊は外からは観察できない。

IV. 破壊様式と雪の密度及び円柱の高さとの関係

同一速度 v で積雪円柱を圧縮する場合、破壊様式が円柱の高さ h 及び雪の密度 ρ によって変る傾向がみいだされた。その傾向を図に表わしたのが第1図である。ただし、内部破壊は稀にしか起こらないことと、常に他の型の破壊に付随して起こることのために記入していない。圧縮速度 v は、29~37 mm/min の範囲である。第1図の実線が塑性変形と破壊変形の境界線で、その左側に破壊変形領域が広がる。粉碎圧密型破壊を表わす黒丸印は、破壊領域にまんべんなく分布している。しかし、破壊領域の上部では、即ち密度 ρ が 0.42 g/cm^3 より大きい所では、他の破壊様式が圧密型といれかわる傾向が認められる。さらに、このように密度が大きいうえ円柱が低く h が 10 cm 以下ならば、縦われ型の破壊が多く、円柱が高くなり h が 10 cm を越えて塑性変形領域に近づくと欠けおち型と横われ型が目立ってくる。なお横われ型の破壊は、密度 ρ の小さなところでも起こる。

積雪円柱の高さがさらに高くなって 20~25 cm を越えると、円柱はもはや破壊せず塑性変形を起こすようになる。塑性変形と破壊変形の境界を定めるものが圧縮歪速度 $\dot{\epsilon}$ でなく圧縮速

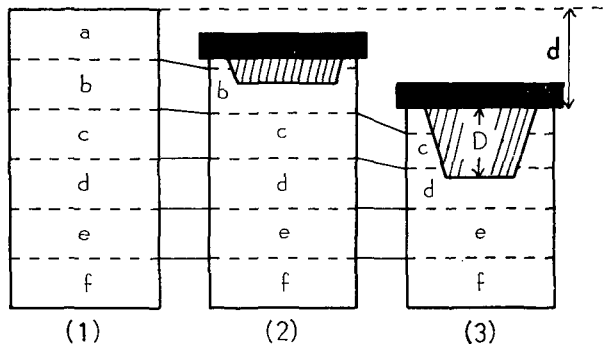


第1図 破壊様式と雪の密度及び円柱の高さとの関係

度 v であるならば、積雪円柱をいかに高くしても塑性変形は起こらないはずである。しかし、実際には同一圧縮速度 v に対して、破壊変形と塑性変形の境界線が第1図の実線で示されるように、円柱の高さが 20~25 cm のところに存在する。

V. 粉砕圧密型破壊の経過

先に述べたように、粉砕圧密型の破壊を起こした積雪円柱は、インクに濃く染まる圧密部分とその外側の染まらない部分とからなる。木下は、積雪円柱の側面に、柱の軸方向に等間隔のインクの印をつけ、圧縮によってインクの印の間隔が縮まらないことを観察した¹⁾。即ち、柱は端面での破壊のため背は低くなるが、破壊されずに残っている部分は圧縮されないわけである。さらに、いろいろな圧縮段階で試料を縦わりにして、色水をかけて、圧密部分の成長をしらべた。その結果、圧密部分は次のような経過をたどって拡大することを知った⁴⁾。即ち、圧密部分は截頭円錐形をなし、圧縮板が下がるとともに截頭円錐は高さをます。しかし、圧縮板と接する円錐の底面はあまり拡大しないで、截頭面はしだいに狭くなり、

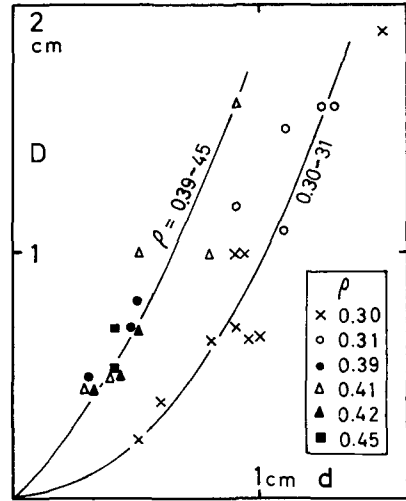


第2図 粉砕圧密型破壊の経過

ついに圧密部分は先のとがった円錐になる。この状態になったとき、さらに圧縮板を下げると円柱は縦にわれる。筆者も木下と同様な観察を行ない、同様な結果をえた。ただ、破壊されず残っている円柱部分も、破壊端面付近では少し縮むことを確認した。第2図に圧縮経過を模式的に示す。左側の矩形は圧縮前の積雪円柱を表わし、

a, b, c, d, …… は円柱の側面につけたインクの印で区切られた雪層である。圧縮板を下降させて、しばらくしてからの状態が中央の図2に示されている。層 a はその大部分が破壊されて消失し、圧縮板の下には斜線をほどこした截頭円錐形の圧密部分が現われた。層 b と c は少し縮んでいる。しかし、層 d, e, f には縮みは認められない。さらに圧縮が進むと (3) の状態になり、層 d も縮み圧密部分は厚くなる。

圧密部分の厚さ D と圧縮板の降下距離 d との関係を示したのが第3図である。圧密部分の厚さ D は、積雪円柱を縦に切断しないと測れない。それで、第3図の測定点は多くの試料を異なる程度に圧縮して切断しては D を測って定めたものである。それで、測定点は散在して規則正しい曲線上にはのらないが、圧密部分の厚さ D は、圧縮板降下距離 d に比例する以上の速さで増大することがわかる。



第3図 圧密部分の厚さと圧縮量との関係

VI. 破壊様式と雪の抵抗力曲線

破壊変形の際、積雪円柱が示す抵抗力は破壊形式によってちがう。以下に、抵抗力の時間的変化を表す抵抗力曲線を各破壊形式について示す。図版 II-1 は、粉碎圧密型破壊の抵抗力曲線である。縦軸は抵抗力 P 、横軸は時間 t を表す。圧縮速度は一定 ($v=37$ mm/min) なので、横軸は圧縮量を表わしていると考えてもよい。A 点は圧縮板が雪に接した瞬間、B 点は圧縮板の下降を停止した瞬間を示す。A 点と B 点の間の鋸歯は、積雪円柱の間歇的破壊に対応している。鋸歯の頂で積雪円柱の端面が破壊し、雪粒が側方に飛び散る。図に見られるように、抵抗力は始め小さな破壊を伴いつつ急速に増大して最大値 P_m に達し、そのあとは間歇的に破壊を繰返しつつ徐々に減少する。X 点及び Y 点での抵抗力の大きな減少は、円柱端面の周辺部が欠けおちたために起こったものである。図版 II-3 は、欠けおち型、縦われ型の破壊によくみられる抵抗力曲線である。A 点で圧縮が始まると、抵抗力は急に大きくなるが、円柱の欠けおち、縦われのため、抵抗力は忽ち下降する。その後は、圧縮を続けても大きな抵抗力は現われない。図版 II-4 は、横われ型破壊の抵抗力曲線である。図中、A 点から X 点までの間の破壊は、積雪円柱の上端で起こった。X 点で抵抗力が急激に下がっているが、ここでいまままで円柱上端面でおこった破壊が、円柱の中央で起こるようになった。つまり、破壊面が円柱上端から中央に移動したわけである。円柱中央の破壊によって現われた抵抗力が、X 点から B 点

までの間に示されている。A 点から X 点までの抵抗力曲線と、X 点から B 点までの曲線は共に粉碎圧密型破壊の抵抗力曲線とよく似ている。

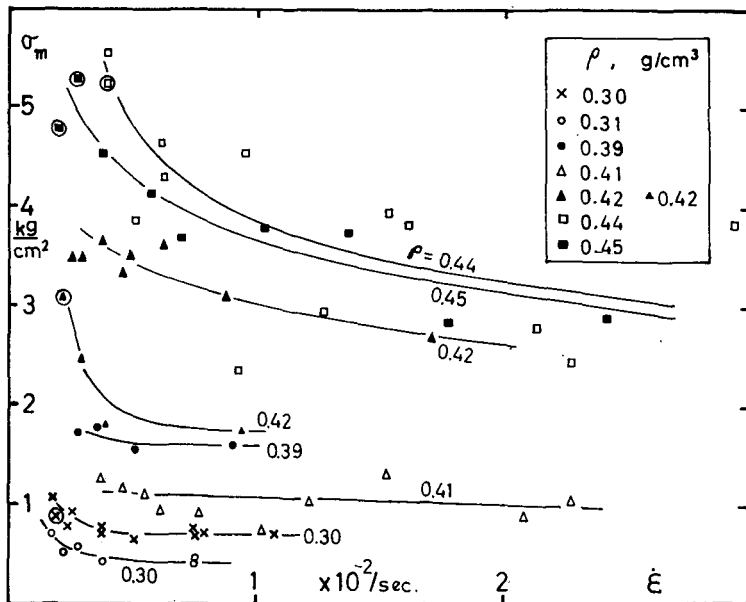
図版 II-5 は、積雪円柱が塑性変形をうけるときの抵抗力曲線である。抵抗力曲線はなめらかな連続曲線である。

VII. 積雪の抵抗力曲線の形と円柱の高さとの関係

抵抗力曲線の形は、積雪円柱の高さ h によって変る。先に出した図版 II の 1 と 2 は、実は密度と雪質とは同じであるが、高さのちがう円柱についてとった抵抗力曲線である。いずれの場合も、圧縮速度 v は 37 mm/min であるが、 h は図版 II-1 で 10.0 cm、図版 II-2 で 2.9 cm であった。抵抗力 P の最大値を P_m とすると、 P_m は図版 II-1 と図版 II-2 ではかなり違う。また、抵抗力曲線の鋸歯の間隔 τ にも違いがある。

1) 最大破壊応力 σ_m と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係

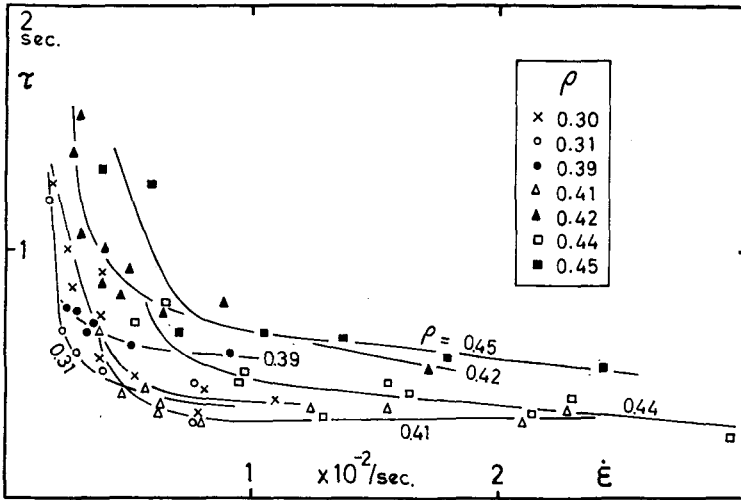
第 4 図に、多くの積雪円柱について得た最大破壊応力 σ_m と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係を示した。 σ_m は、抵抗力の最大値 P_m を円柱の面積で割ったものである。横軸に歪速度 $\dot{\epsilon} = v/h$ を、縦軸に σ_m がとってある。圧縮速度 v は 29~37 mm/min の範囲に、 h は 2~26 cm の範囲にある。ただし、 h には全て圧縮開始のときの円柱の高さをとった。第 4 図から、 $\dot{\epsilon}$ が大きくなるにつれて、 σ_m が小さくなるのが解る。即ち、圧縮速度が同一なら、積雪円柱が高い程、 σ_m は大きい。また、 σ_m の $\dot{\epsilon}$ による減少率は、密度 ρ の大きい積雪ほど大きい。図中、大きな円でかこまれた印は、塑性変形を示す。塑性変形の最大破壊応力 σ_m としては、積雪の降伏点の応力をとった。塑性変形と破壊変形との境界は、 $\dot{\epsilon} = 2 \sim 4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ のところにあることがわかる。



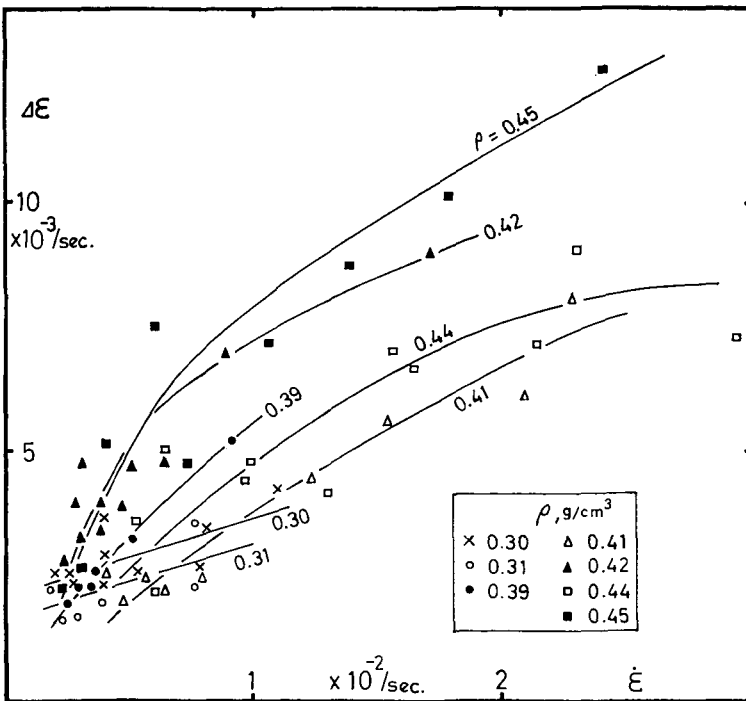
第 4 図 最大破壊応力と歪速度との関係

2) 抵抗力曲線の鋸歯の幅と歪速度との関係

第5図に、歪速度 $\dot{\epsilon}$ と秒で表わした抵抗力曲線の鋸歯の幅 τ との関係を示した。一つの抵抗力曲線に関しても、 τ は一定でないので、 τ の値としては平均値を用いた。 τ は $\dot{\epsilon}$ の増大と共に、ほぼ $\dot{\epsilon}$ の逆数に比例して減少する。



第5図 抵抗力曲線の鋸歯の時間間隔 τ と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係



第6図 $\Delta\epsilon = \dot{\epsilon} \times \tau$ と歪速度 $\dot{\epsilon}$ との関係

第6図は、 $\Delta \varepsilon = \tau \cdot \dot{\varepsilon}$ と $\dot{\varepsilon}$ との関係である。積雪円柱は、歪 ε が $\Delta \varepsilon$ 増すごとに破壊するわけである。 $\Delta \varepsilon$ は $\dot{\varepsilon}$ と共に大きくなる傾向がある。

VIII. ま と め

この実験は、破壊圧縮と塑性圧縮との境界を定めるものが、圧縮速度 v であるか、歪速度 $\dot{\varepsilon}$ であるかを明らかにする目的で行なわれた。そのために、圧縮速度を一定 (29~37 mm/min) にして、高さの異なる多くの積雪円柱を圧縮した。得られた結果をまとめると次のようになる。

1) 積雪円柱の破壊のしかたを5つの型に分類した。最も普遍的な粉碎圧密型の破壊は、円柱が高くなると、横われ型や欠けおち型の破壊といわれかわる傾向を示す。さらに、円柱が高くなって20~25 cmを越えるようになると、円柱は破壊せず塑性的に変形する。即ち、歪速度 $\dot{\varepsilon} = 2 \sim 4 \times 10^{-3}/\text{sec}$ のところが、塑性変形と破壊変形との境界である。

2) 破壊変形の場合、積雪円柱が高くなる程、最大破壊応力 σ_m 、及び反抗力曲線の鋸歯の幅 τ は共に大きくなる。即ち、塑性変形と破壊変形との境界付近で、 σ_m 及び τ は最大値をとる。歪速度 $\dot{\varepsilon}$ で言いかえれば、 $\dot{\varepsilon}$ が大きくなる程、 σ_m 及び τ は小さくなる。

終りに、この研究に際し色々御指導いただいた吉田順五教授、又種々御助言をいただいた木下誠一教授並びに若浜五郎助教授に厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 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**, 139-166.
- 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 1964 雪を平板でおすときの接触面の観察. 低温科学, 物理篇, **22**, 73-82.

Summary

Kinosita (reference (1), (2) and (3)) studied how cylindrical columns of snow were deformed when compressed at constant speeds v ranging from 1 mm/min to 40 mm/min. He found that the columns were subjected to destructive contraction when v was above a certain critical speed v^* , while they underwent plastic contraction for v less than v^* . The critical speed v^* was 7~12 mm/min in the case of hard snow ($\rho = 0.35 \sim 0.43 \text{ g/cm}^3$). Kinosita was of the opinion that what separated the two kinds of contraction was the critical velocity v^* itself. But the present author thought that the manner of contraction should depend upon the rate of change in strain $\dot{\varepsilon} = v/h$ (h : height of the columns), and he made the compressive experiments on columns of various height h with the compressive speeds v maintained nearly at a definite value. If Kinosita were correct, the destructive contraction would not shift to the plastic one however tall the column is made. But, as will be described below, the destructive contraction changed into the plastic contraction when h exceeded a certain value.

The height h of columns was changed from 2 cm to 25 cm and the speed v of compression was 29 mm/min, 31 mm/min and 37 mm/min. It was found that the columns of snow lower than 20~25 cm were subjected to the destructive contraction and those taller than 20~25 cm to the plastic contraction. So the boundary strain rate $\dot{\epsilon}$ at which the destructive deformation passes over to the plastic one is $2\sim 4\times 10^{-3}/\text{sec}$.

The destructive contractions could be classified into the following five types. The first type **A** was the commonest in the sense that it occurred in the initial stage of contraction of any other types.

1. Type **A**. The contraction of this type occurred in such a way that the column was broken down intermittently on either of its top and bottom planes. The body of column which remained unbroken suffered a little contraction only near the breaking end. A part of the broken snow was squeezed out from the breaking end plane while the other part was compacted in a region protruding from the breaking end plane into the body of column. The photograph 1 in Pl. I shows the vertical section of the column sprayed with coloured water. The region of compacted snow is distinguished by the deep colour. When the contraction of type **A** keeps without changing into other type, the curve of resisting force P versus time t takes the form of saw-teeth as shown in Pl. II-1.

2. Type **B**. The column is separated into a few pieces by vertical cracks as shown in Pl. I-3, after it has for a short time been subjected to intermittent break down similar to the type **A** at the end plane. No region of packed snow is seen on the sprayed section. The curve of resisting force is shown in Pl. II-3.

3. Type **C**. The shoulder of the column is cut off as shown in Pl. I-4.

4. Type **D**. The intermittent break down of type **A** occurring at the end of column stops suddenly and the same type of break down begins on a horizontal plane in the body of column as shown in Pl. I-5. Of the curve in Pl. II-4, the portions from A to X and from X to B correspond respectively to the intermittent break down occurring at the end plane and in the middle part.

5. Type **E**. Irregularly curved segments such as marked A in Pl. I-7 were found on some of the sprayed sections of the columns. The segments show that some kind of break down occurred where they are located. But such break downs cannot be noticed from the outside, because the segments do not reach the side surface of columns. So the author names it internal fractures.

What type of contraction occurs depends upon the height h and the density ρ of the snow columns. In the h - ρ plane of Fig. 1, occurrence of different types is indicated by different marks: type **A**—solid circle, type **B**—I shape, type **C**—inverse V, type **D**— \curvearrowright , plastic deformation—dot in circle. The plane is divided, by the full curve drawn obliquely downwards from middle point of the top edge, into the regions of destructive and plastic contraction. The marks of type **A** are scattered evenly almost on the whole region of destructive contraction. But the low columns of large density (of small h and large ρ) are likely to be subjected to the type **B** while high column of small density (of large h and small ρ) to the types **C** and **D**.

Difference in h brought some changes also in the curve of resisting force. If the

force corresponding to the highest point of the curve of resisting force is denoted by P_m , and the cross section of column by A , the ratio $\sigma_m = P_m/A$ gives the maximum stress to which the column was subjected. As seen from Fig. 4 where σ_m is plotted against $\dot{\epsilon}$, σ_m becomes smaller as $\dot{\epsilon}$ is increased. The time interval τ between two successive break downs in the contraction of type **A**, that is, the breadth of one saw-tooth of the curve of resisting force, becomes smaller as $\dot{\epsilon}$ is increased, as shown in Fig. 5. In other words, both σ_m and τ rise with increasing h .

