



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	塑性圧縮による積雪の氷への転化
Author(s)	木下, 誠一; KINOSITA, Seiiti
Citation	低温科学. 物理篇, 20, 131-157
Issue Date	1962-03-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17987">https://hdl.handle.net/2115/17987</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	20_p131-157.pdf



## 塑性圧縮による積雪の氷への転化\*

木下 誠 一

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和36年11月受理)

### 緒 言

積雪から切り出した雪の柱を定速度で圧縮する場合、圧縮速度がある限界値より大きいと柱の端面で破壊が起る。(このような圧縮を破壊圧縮とよぶ。)しかし、圧縮速度が限界値より小さければ、破壊は起らず雪の柱は塑性的に縮む。(これを塑性圧縮とよぶ。)この二種類の圧縮における応力、限界圧縮速度、及びそれらと雪の密度、温度との関係などについては、筆者の論文「積雪における変形速度と変形形式との関係; I<sup>1)</sup>, II<sup>2)</sup>, III<sup>3)</sup>」において、既に詳しく述べた。

塑性圧縮の場合には、雪の柱に現われる反抗力は、歪が1%位になるまでは急に、その後はゆるやかに、増大する。これまでの実験では、測定器の関係から、反抗力が高々300 kgまでの圧縮しか行なえなかつた。しかし、今回、島津製作所製の万能試験機を得て、反抗力が10トンまでの強い圧縮を行なうことが出来るようになった。そして、雪の柱を、始めの高さの10%以下まで塑性的に圧縮し、氷に変換することが出来た。

雪の柱の塑性圧縮の途中で、何回か圧縮を中断し、雪の組織の変化を調べるために、顕微鏡観測用の薄片を雪の柱から切り取った。それらにより、雪が氷になるまでに起る組織変化の経過を詳しく知ることが出来た。

その結果を以下に次の順序によって述べる。

第 I 節。雪の円柱の塑性圧縮経過の一例を写真によって示すとともに、雪の円柱の現わす反抗力について説明する。

第 II 節。多くの雪の円柱について得られた実験結果をとりまとめて説明する。

第 III 節。圧縮による雪の組織の変化の過程を、薄片の写真によって示す。

第 IV 節。圧縮による雪の組織変化を模式図を用いて考察する。

第 V 節。雪の円柱が縮む途中のポアソン比について述べる。

第 VI 節。自然に野外で起る積雪の塑性圧縮と、この実験で得られた結果とを比較する。

第 VII 節。多結晶氷に定荷重をかけて放置すると、結晶が大きくなることについて述べる。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第599号

## I. 雪の円柱の塑性圧縮の一例

### (a) 雪の柱がほぼ一様に圧縮される初期の圧縮

雪の円柱をその限界圧縮速度  $v^*$  より遅い速度でおすと、塑性圧縮が起る。雪の柱の高さが 10 cm の程度なら、 $v^*$  は数 mm/min の大きさである。 $v^*$  は雪の密度、温度で多少異なるが、 $v^*$  と密度、温度との関係は、筆者の別の論文<sup>2)</sup> に詳しく述べてある。それによると、密度 0.37、温度  $-9^{\circ}\text{C}$  のしまり雪では、 $v^*$  がほぼ 7mm/min である。万能試験機を用い、この密度、温度のしまり雪の柱を、 $v^*$  に比べると遙に小さい 1~1.8 mm/min の速度で 90% 以上も塑性圧縮した。そのときの変形の様子を第 1 図に示した。写真の (1) は圧縮前の雪の円柱で、高さ 13.8 cm 直径 4.8 cm である。前面に、10 ケ所、ほぼ等間隔にインクで細い線の印がつけてある。この 10 ケの印の間隔の変化から、柱の圧縮歪  $\epsilon$  の分布がわかる。写真 (2) は圧縮開始後 41 分たったときで、高さは 9.3 cm (平均歪  $\bar{\epsilon}=0.33$ ) に縮み、直径は 5.1 cm にふえた。前面の印の間隔は、みな、同じ割合で短縮し、柱全体が一様に縮んだことを示している。写真 (3) は圧縮開始後 74 分の状態である。高さは 4.6 cm、すなわち、始めの高さの 33% ( $\bar{\epsilon}=0.67$ ) に縮み、直径は 6.4 cm になった。しかし、柱の前面のインクの印の間隔は、始めの間隔の 40% に縮んだにすぎない。一番下の印は台の影にかくれて見えないが、見える 9 ケの印の間の間隔は 3.85 cm で、始めの間隔 9.5 cm の 40% なのである。写真 (3) の状態になったときに、圧縮を一旦とめた。それまでの圧縮速度は 1~1.5 mm/min で、平均 1.2 mm/min であった。(万能試験機では、速度を完全に一定に保つことが難しく、長時間の間には少し変動する。)

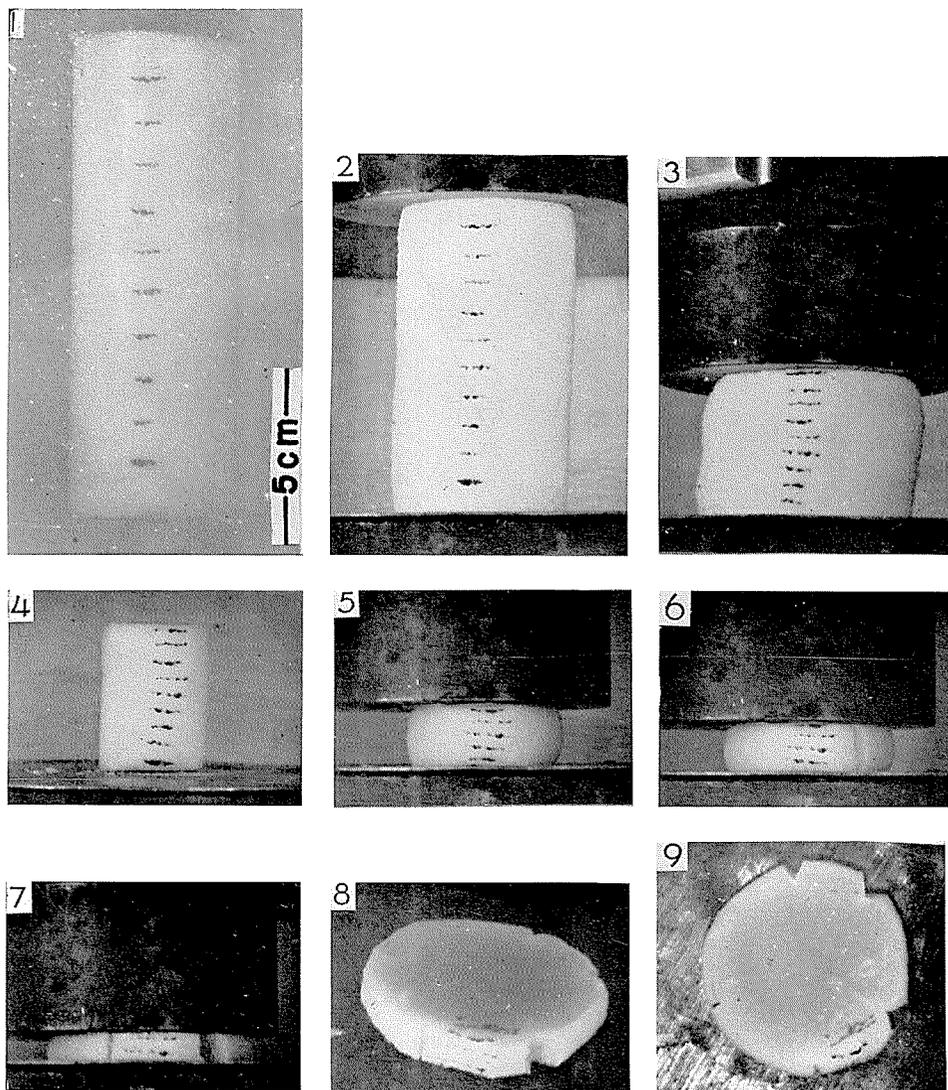
### (b) 初期圧縮における雪の抵抗力

うへの圧縮の間に、試験機に記録された力が、第 2 図の左側の実線  $abcd$  ( $F$ ) である。第 2 図の縦軸は氷の柱の抵抗力  $F$ 、横軸は円柱の高さ  $h$  であるが、それとともに、圧縮歪  $\epsilon=(h_0-h)/h_0$ 、 $h_0$  は始めの円柱の高さ) 及び圧縮時間  $t$  も示してある。又図の上縁には柱の縮み  $h_0-h$  を示してある。始めの a 点から b 点までは、力  $F$  が急激に増大する。歪  $\epsilon$  が大体 0.15 の c 点からは、力  $F$  の増し方が少しづつ急になって行く。圧縮開始後 74 分、写真 (3) のときには、 $F$  は 460 kg にまでに達した。このときの雪の円柱の密度は、体積減少の割合から計算すると、0.64 となる。

雪の柱は、圧縮が進むにつれ、断面の直径も次第にまして行くので、単位面積当りの力、すなわち応力  $p$  は力  $F$  には比例しない。増大する断面積で  $F$  を割って、応力  $p$  を計算すると、第 2 図の点線  $a'b'c'd'$  ( $p$ ) のようになる。大体の傾向は力の曲線  $F$  に似ているが、c 点以後の増大のしかたが、 $F$  の増大のしかたに比べると、ゆるやかである。d' 点の最終応力は  $14.6 \text{ kg/cm}^2$  で、b' 点の降伏応力  $1.4 \text{ kg/cm}^2$  のほぼ 10 倍である。それに対し、最終の力 460 kg は降伏力 26 kg のほぼ 18 倍になる。

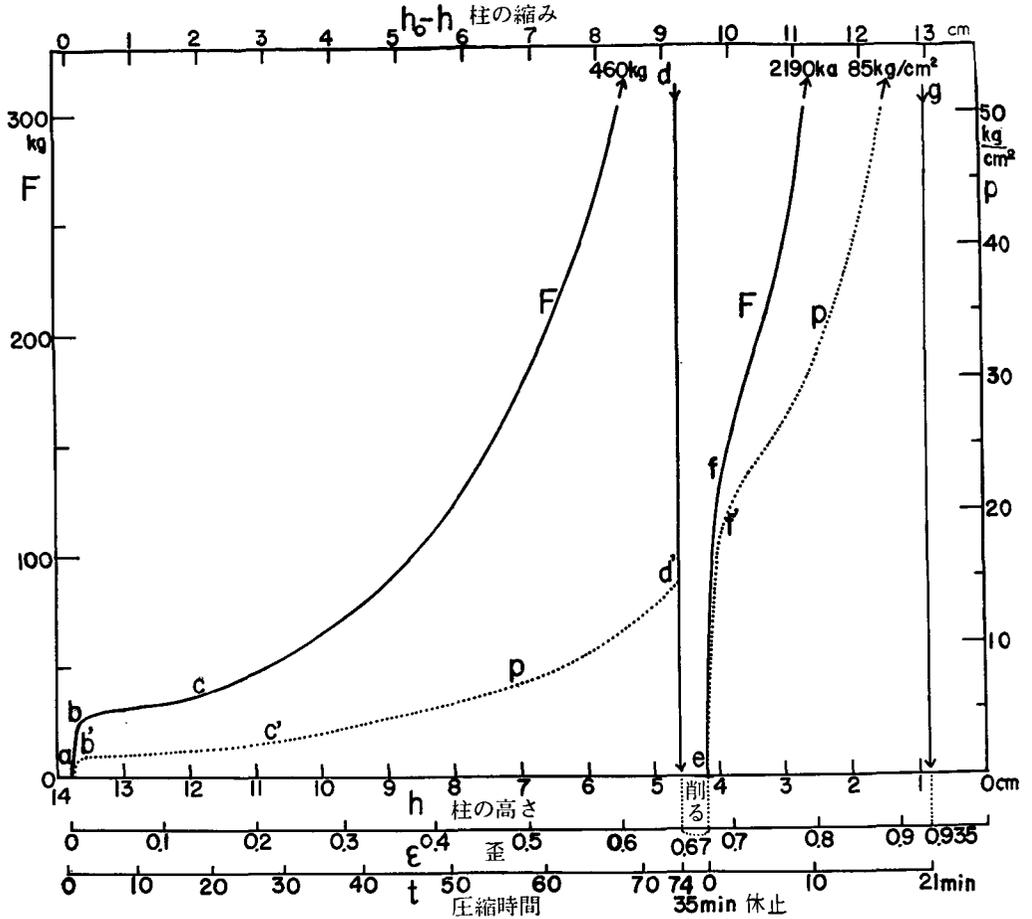
### (c) 雪の柱の内部と周辺部とで圧縮程度の違う後期圧縮

雪の柱を試験機から外し、その上端部の 4 mm を切りとって、薄片製作のための試料にし



第1図 雪の円柱の圧縮過程。はじめの雪の密度  $\rho_0=0.37$ ，温度  $-9^{\circ}\text{C}$ 。圧縮速度  $v=1\sim 1.5\text{ mm/min}$  ((1), (2), (3)),  $1.5\sim 1.8\text{ mm/min}$  ((4), (5), (6), (7))。

- 1 はじめ，高さ  $h=13.8\text{ cm}$ ，直径  $D=4.8\text{ cm}$ 。
- 2 41分後， $h=9.3\text{ cm}$ ， $D=5.1\text{ cm}$ 。
- 3 74分後， $h=4.6\text{ cm}$ ， $D=6.4\text{ cm}$ ，一旦圧縮をとめる。
- 4  $h=4.2\text{ cm}$ ， $D=2.9\text{ cm}$  に削つて，圧縮を再開。
- 5 15分25秒後， $h=1.8\text{ cm}$ ， $D=4.35\text{ cm}$ 。
- 6 17分35秒後， $h=1.44\text{ cm}$ ， $D=4.75\text{ cm}$ ，中央より少し右に割目が見える。
- 7 21分後， $h=0.83\text{ cm}$ ， $D=5.8\text{ cm}$ 。
- 8 圧縮されてできた氷の板を斜め上方からみたところ。
- 9 圧縮されてできた氷の板を上からみたところ。



第 2 図 圧縮力  $F$ 、応力  $p$  と雪の柱の高さ  $h$ 、歪  $\epsilon$ 、時間  $t$  との関係。(第 1 図の写真の圧縮の場合)。雪のはじめの密度  $\rho_0 = 0.37$ 、温度  $-9^\circ\text{C}$ 、abcd 部分の圧縮速度の平均は  $1.2 \text{ mm/min}$  ( $1.0 \sim 1.5$ )、efg 部分の圧縮速度の平均は  $1.6 \text{ mm/min}$  ( $1.5 \sim 1.8$ )。

た。そして、残りの 9 ケのインクの印のついた所は残して、柱の側面を削り、直径 2.9 cm の細い柱にした。第 1 図の写真 (4) がそのときの柱である。柱を細くしたのは、大きな応力  $p$  を得るためである。この柱を再び圧縮したのであるが、それまでの休止時間は 35 分であった。再圧縮開始後 15 分 25 秒たったときの写真が (5) である。柱の高さは 1.8 cm、直径は 4.35 cm である。このときの歪  $\epsilon$  を、第 1 回の圧縮による歪も勘定にいれて求めると、 $\epsilon = 0.87$  となる。すなわち、第 1 図写真 (1) の柱の高さが 13% になったことに相当する。側面のインク印のうちで、上下の 2 つずつ合計 4 つが消えている。残りの 5 つのインク印の間隔は 1.54 cm で、第 1 回圧縮前の 4.8 cm の 32% である。柱全体としては、始めの 13% に縮んだのであるから、側面の縮みは、柱の内部の縮みに比べると、非常に少ないことになる。

第1図の写真(6)は、再圧縮開始後17分35秒で、柱の高さが1.44 cm、直径が4.75 cmになったときの写真である。 $\epsilon=0.896$ という大きな圧縮をうけ、柱の高さは始めの10.4%になってしまった。前面のインクの印は、更に最下の1つが減って、4つだけ残っている。この4つの印の間隔から、側面の圧縮を求めると、始めの32%に縮んだことになる。この値は、写真(5)の場合と同じである。よって、写真(5)と(6)との間で、雪の柱は内部では縮んだが、側面の部分では縮まなかったことになる。

写真(7)は、再圧縮開始後21分の写真で、柱は高さ0.83 cm、直径5.8 cmになった。このときの歪 $\epsilon$ は0.935という非常に大きなものである。柱の高さは始めの6.5%にすぎない。前面の印は2つだけが見える。写真(6)より更に上1つ下1つの印が減った。残った2つの印の間隔は0.43 cmで、圧縮前には1.2 cmあった。従って、側面の部分は始めの36%に縮んだわけである。柱全体としては6.5%にも縮んだのに、側面の部分は依然として32~40%にしか縮んでいない。結局、写真(3)(第1回圧縮の最後)のとき以来、側面の部分は縮んでいないことになる。柱が始めの高さの40%になるまでは、柱は全体が一樣に縮んだが、その後、側面の部分だけは縮みを止めたわけである。

#### (d) 後期圧縮におけるインク印の移動

再圧縮開始から21分間に、インクの印が上で3つ、下で4つ、前面から消えた。写真(7)のときに、圧縮をとめ、薄く板の形になった試料をとり出して、圧縮板と接していた上下の面をみると、始め前面の上部にあった3つの印は上端面に、下部にあった4つの印は下端面に入りこんでいることが解った。写真の(8)と(9)は、夫々斜め上及び真上から、その最終試料をみた写真である。上部の3つの印のうち、始めに上端面に入りこんだ内部の2つは、その間隔がせばまっている。上端面に入りこんでから、圧縮をうけたことになる。写真(8)にみられるように、雪の板は縁の幅数mmの部分が中央部に比べて白っぽく見える。これは、中央はすでに氷に変っているのに、縁の部分はまだ圧縮の度が少なく、完全には氷になっていないためである。実際、中央部は図版VII-1の組織の顕微鏡写真が示すように、氷である。このように、雪の柱を塑性圧縮する場合、圧縮が強いと、圧縮は柱全体にわたって一樣なものではなくなる。したがって、雪の密度も柱の内部と周辺部とで違うが、第1図の写真(7)の場合について、平均密度を計算すると、氷の密度0.92に近い0.89である。

塑性論(文献4の235頁)の二次元問題に、有限幅の塑性体が完全に粗い圧縮板で上下方向に塑性圧縮される問題がある。それによると、塑性体の側面部分は完全塑性状態にあるに拘らず、恰も剛体であるかのように、水平に外側に向かって移動する。一方、圧縮板と接する塑性体の上下の面は、圧縮板の面が粗いため広がることが出来ない。それで、圧縮が進むにつれ、塑性体の側面上端下端に近い部分はくりこまれて、圧縮板と接触するようになる。上に、雪の柱の側面につけたインクの印のうち、上端下端に近いものが圧縮板にくりこまれて見えなくなることを述べたが、それは、正にこの理論の結果と一致する。

## (e) インク印の横方向の伸び

雪の柱が縮むにつれ、側面につけたインク印は横にのびる。たとえば、第1図の圧縮前の雪の円柱の写真(1)で上から5番目の印の横の長さは7.5 mmであるが、その印は写真(3)で9 mmの長さに、又最後の写真(7)では(上の印)、途中にいくつかの切れ目が入っているが、13 mmの長さ、すなわち、はじめの約1.7倍の長さに伸びている。このように、インク印に切れ目が入るのは、雪の柱の周辺部が横に広がるときに、表面の印のついた雪粒の間の所々に、内部の雪粒が割りこむためである。若浜<sup>5)</sup>によると、積雪の組織は、雪粒間のつながりが密である雪粒集団すなわち基本領域に分割され、基本領域の間の結合は弱い。その結果圧縮に際しては、基本領域はほとんどその内部に変化を起さないままで、全体として移動する。いまの雪の柱につけたインク印の場合でも、基本領域の雪粒群が移動して、表面に割りこむので、インク印の途中に1 mm程の幅の白地が出来るものと考えられる。

## (f) 雪の柱に出来る割れ目

第1図の写真(5)で、インク印の少し右によった所に、上下に走る幅0.5 mm程の細長い割れ目がみえる。この割れ目は、写真(6)では3.5 mmの幅に、写真(7)では9 mmの幅に広がっている。割れ目が広がるのは、基本領域間の脆弱部分が完全に切れて、それを境にしていた基本領域同士が速ざかるということの説明される。この割れ目が広がる速度は、ほぼ1.5 mm/minで、圧縮速度と同じであった。写真(7)の氷の板を上からみた写真(9)によると、割れ目は全部で5つある。いずれも上から下まで通っていて、その奥行は3~5 mmである。

## (g) 後期圧縮における雪の抵抗力

雪の柱がほぼ一様に圧縮される初圧縮のあと、あらためて行なったこの再圧縮での力及び応力の曲線を、第2図右側に実線  $F$  及び点線  $p$  で示した。どちらも始めは急激に増大するが、降伏点  $f$  をすぎると、増大のしかたが一時ゆるやかになって、再び急になる。降伏点での力はほぼ130 kg、応力は18 kg/cm<sup>2</sup>で、初圧縮の最終応力14.6 kg/cm<sup>2</sup>より少し大きい。第1図写真(7)、(8)、(9)に示した厚さ0.83 cmの氷の薄板にまで縮んだときには、力は2190 kg、応力は85 kg/cm<sup>2</sup>という大きなものであった。再圧縮の降伏点以後の応力曲線は、ほぼ初圧縮の応力曲線  $a'b'c'd'$  をそのまま延長したものになっている。

この実験は、圧縮速度をほぼ一定に保って行なった。しかし、圧縮が非常に大きいので、圧縮歪の変化速度  $\dot{\epsilon}$  は圧縮が進むに従い、非常に大きくなった。(a)項の初圧縮では、 $\dot{\epsilon}$  は  $1.5 \times 10^{-4}$  1/sec から  $4.6 \times 10^{-4}$  1/sec まで約3倍に増大したが、再圧縮では  $6.4 \times 10^{-4}$  1/sec から  $32 \times 10^{-4}$  1/sec までと、約5倍も増した。しかし、 $p = \eta \dot{\epsilon}$  で定義される圧縮粘性係数  $\eta$  は、初圧縮では  $1 \times 10^{10}$  pois から  $3 \times 10^{10}$  pois まで、3倍になったに拘らず、再圧縮ではほぼ  $3 \times 10^{10}$  pois の一定の値であった。

以上、雪の円柱の塑性圧縮の一例を示した。はじめの雪の密度、温度、圧縮速度などにより、圧縮にともなっている現象に差異がみられる筈であるが、次節で述べる筆者のこれまでの実験では、どの実験でも、第1、2図に示したものとほぼ同一の圧縮過程がみられた。

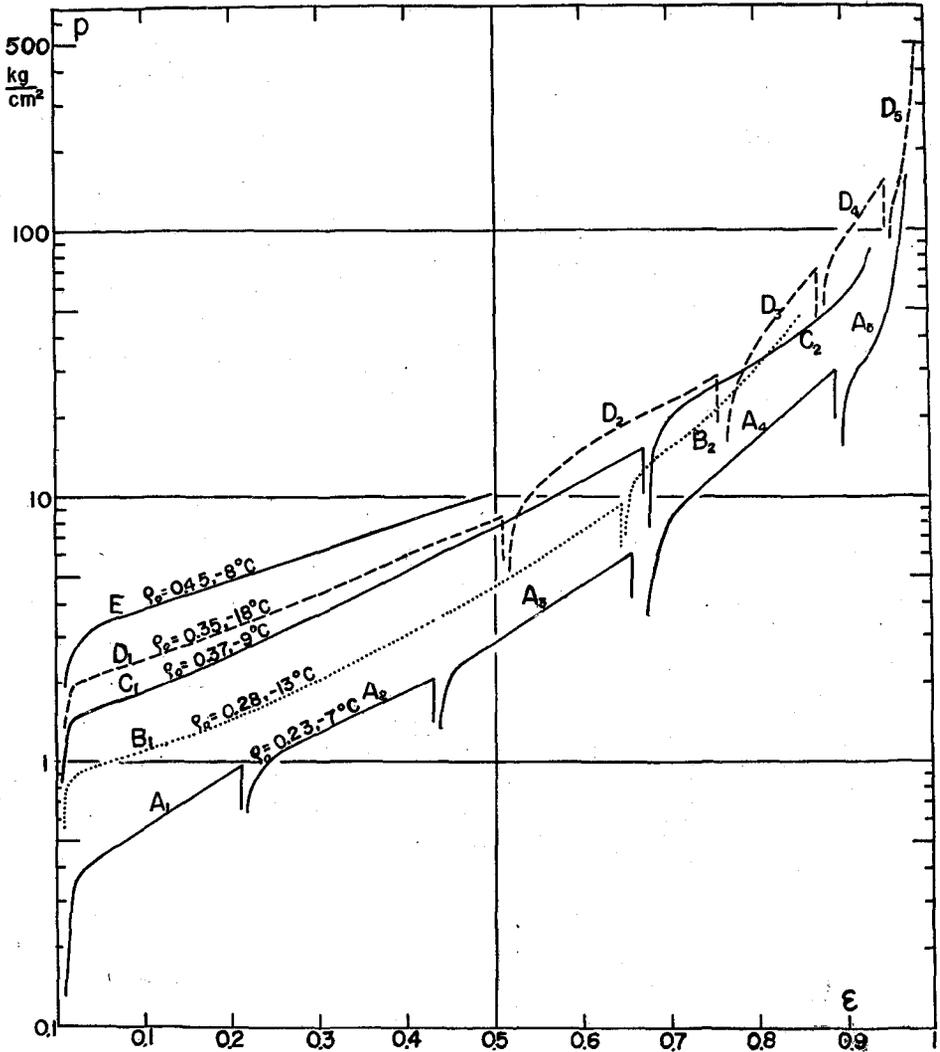
II. 実験結果の総合

(a) 歪と応力との関係

応力-歪曲線は、応力  $p$ 、歪  $\epsilon$  の両方を直線スケールで表わすと、第2図のように、歪がましましたときの応力が大きくなりすぎて表しにくい。それで、第3図では、前節に述べた実験例と他の4つの実験例とについて、 $p$  の対数と  $\epsilon$  との関係をグラフに示した。Aの曲線が、 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$  と5つに別れているのは、圧縮が途中で中断され、5回に分けて行なわれたことを示す。その他の曲線についても同じである。圧縮を中断するたびに、雪の柱の端面を少し削りとして、組織観察用薄片の製作のための試料とした。又、周囲を削って柱を細くし、単位面積当りに大きな力がかかるようにした。この圧縮中断の時間は、10分から高々1時間位であった。圧縮中断による応力の不連続部分を除くと、各応力曲線ともほぼ滑らかな上昇曲線になる。曲線  $C_1, C_2$  は第I節の第2図の場合のものである。5つの実験例 A, B, C, D, E に関する実験情況、実験結果を次の表に示す。

第 1 表

	始めの 密度 $\rho_0$	終りの 密度	温度	雪の柱の 始めの高 さ $h_0$ , 直 径 $D_0$	雪の柱の 終りの高 さ, 直 径	平均圧縮速度 $\dot{\epsilon}$	歪速度 $\dot{\epsilon}$	粘性係数 $\eta$
$A_1$	0.23	0.28	-7°C	15 cm	11.8	1.3 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$	1.4~1.8×10 <sup>-4</sup> /sec	0.3~0.5×10 <sup>10</sup> pois
$A_2$	0.28	0.35		6.8	6.9			
$A_3$	0.35	0.44		10.4	7.5			
$A_4$	0.44	0.70		6.8	7.1			
$A_5$	0.70	0.89		6.6	4			
				7.1	8.05	1.6	9 ~28	1
				3	0.95	0.31	5.4~26	6
				6.8	9.6			
				0.95	0.2			
				3.4	8.5			
$B_1$	0.28	0.51	-13	12.4	4.4	0.6	0.8~2.3	1.2~4
$B_2$	0.51	0.79		6.6	8.0			
				4.4	1.9	0.9	3.4~8	4~6
				8.0	10			
$C_1$	0.37	0.64	-9	13.8	4.6	1.2	1.5~4.6	1~3
$C_2$	0.64	0.89		4.8	6.4			
				4.2	0.83	1.6	6.4~32	3
				2.9	5.8			
$D_1$	0.35	0.52	-18	14.6	7.2	1.7	1.9~3.9	1~2
$D_2$	0.52	0.64		6.6	7.7			
$D_3$	0.64	0.78		6	2.95			
$D_4$	0.78	0.89		3.7	4.9			
$D_5$	0.89	0.90		2.1	1.1			
				3.9	4.7	0.7	5.6~10.6	5
				1.1	0.4	0.54	8.2~22	7~9
				2.4	3.8			
				0.4	0.08	0.3	12~60	9~11
				2.0	4.8			
E	0.45	0.62	-8	10.2	5.6	5.6	9~17	0.3~0.6
				4	4.6			



第3図 雪の円柱圧縮の際の応力-歪曲線。第1図、第2図の例は、 $C_1$ 、 $C_2$ である。記号の右下に添えた数字は、圧縮の回数を示す。

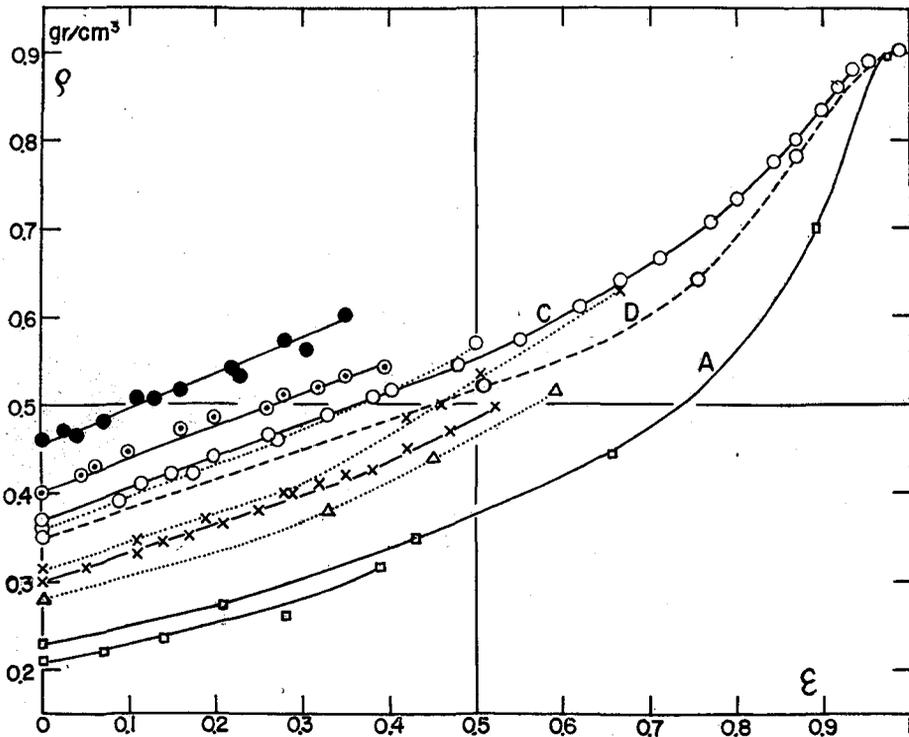
表の右端に示した圧縮粘性係数  $\eta$  の値は、かなり分散しているが、筆者が別の論文<sup>3)</sup>で述べたように、 $\eta$  は密度、歪速度、温度によって非常に違うものである。圧縮の終段で氷の状態になった雪の柱の  $\eta$  はほぼ  $10^{11}$  pois に近い。

第3図に示した5つの応力曲線で最初の降伏値は  $p = 0.35 \sim 3.5 \text{ kg/cm}^2$  の範囲で起っている。降伏した後、 $\log p$  は歪がますますつれ、直線的に上昇する。しかし、歪  $\epsilon$  が0.9になると、すなわち、雪の柱が始めの高さの1/10にまで圧縮されると、応力は  $30 \sim 90 \text{ kg/cm}^2$  に達し、その後は  $\log p$  が急激に増大し始める。曲線  $D_5$  の場合、歪が0.991になるまで圧縮が行なわれた

が、このとき、応力は  $500 \text{ kg/cm}^2$  という大きな値になった。圧縮力は、圧縮機のだしうる最大 10 トンとほぼ同じの 9.9 トンで、雪の柱は厚さ 0.8 mm の氷の板になった。この氷の板は、細かい氷の結晶からなる多結晶氷で、薄板全体に非常に細かい気泡が分散し、白っぽくみえた。その顕微鏡組織については次の第 III 節で述べる。

(b) 歪と密度との関係

雪の柱が非常に強く圧縮され、歪が 95% 以上にもなれば、雪の始めの密度の大小に拘らず雪は氷の状態になる。圧縮が進むにつれ、雪の密度がどのようにまして行くかを第 4 図に示す。曲線 A, C, D は、夫々第 3 図の曲線 A, C, D の実験で得られたものである。密度  $\rho$  の決定は次のようにして行なった。あらかじめ密度計で密度を測定した雪層から、圧縮しようとする雪の柱を取出し、その外形の寸法を測る。ついで、圧縮の途中の雪の柱の外形の寸法を測り体積の縮少率を求める。この体積圧縮率で、はじめの雪の密度を割れば、圧縮途中の密度  $\rho$  になる。しかし、雪の柱の寸法は余り正確には定められないので、このようにして定めた密度には、多少の誤差は免れない。氷の状態に近づくときの密度は、含まれている気泡の量から推定した。



第 4 図 圧縮による密度増大曲線。線で結んだのは、一つの実験で、歪とともに密度が増大して行く過程を示す。A, C, D は夫々第 3 図の A, C, D の実験曲線に対応する。

第4図をみると、どの曲線も歪 $\epsilon$ が0.5位までは、ほぼ直線的に上昇し、しかもほぼ平行である。この範囲では、圧縮歪 $\epsilon$ と密度 $\rho$ (gr/cm<sup>3</sup>)、始めの密度 $\rho_0$ (gr/cm<sub>0</sub>)との間には、次の近似式がなりたつ。

$$\rho = \rho_0 + 0.4\epsilon \quad (0.5 > \epsilon > 0) \quad (1)$$

$\epsilon$ が0.5以上になると、 $\rho$ のまし方は次第に急になり、 $\epsilon=0.92\sim 0.95$ で、 $\rho$ は0.88位になる。しかし、その後は増大のしかたが緩やかになる。漸近的に純氷密度0.917に近づくものと思われる。

### (c) 応力と密度との関係

圧縮とともに密度がますが、同時に応力 $p$ もます。それで、つぎに、応力と密度との関係を調べてみる。筆者は、まえに行なった実験<sup>2)</sup>で、5%の塑性圧縮のときの応力 $p$ は雪の密度 $\rho$ のほぼ三乗に比例することを示した。すなわち、kg/cm<sup>2</sup>、gr/cm<sup>3</sup>で表した $p$ 、 $\rho$ の間に

$$p = 21.4\rho^3 \quad (2)$$

の関係を見出した。

今回行なった強い塑性圧縮では、第5図のような $p$ - $\rho$ 曲線がえられた。A、B、C、D、Eを附した曲線は、夫々、第3、4図の同記号の曲線と同じ実験で得られたものである。黒丸、二重丸、白丸、かけ印、三角、四角の印は、それとは別に行なった夫々の実験の最終値だけをとって表したものである。記号の違いは、初密度の違いを表している。

各曲線とも、はじめは鉛直に立ち、互にはなればなれである。しかし、鉛直線の上端で示される降伏点をすぎると、いずれも、

$$\log_{10} p = -1.1 + 3.7\rho \quad (\rho < 0.85) \quad (3)$$

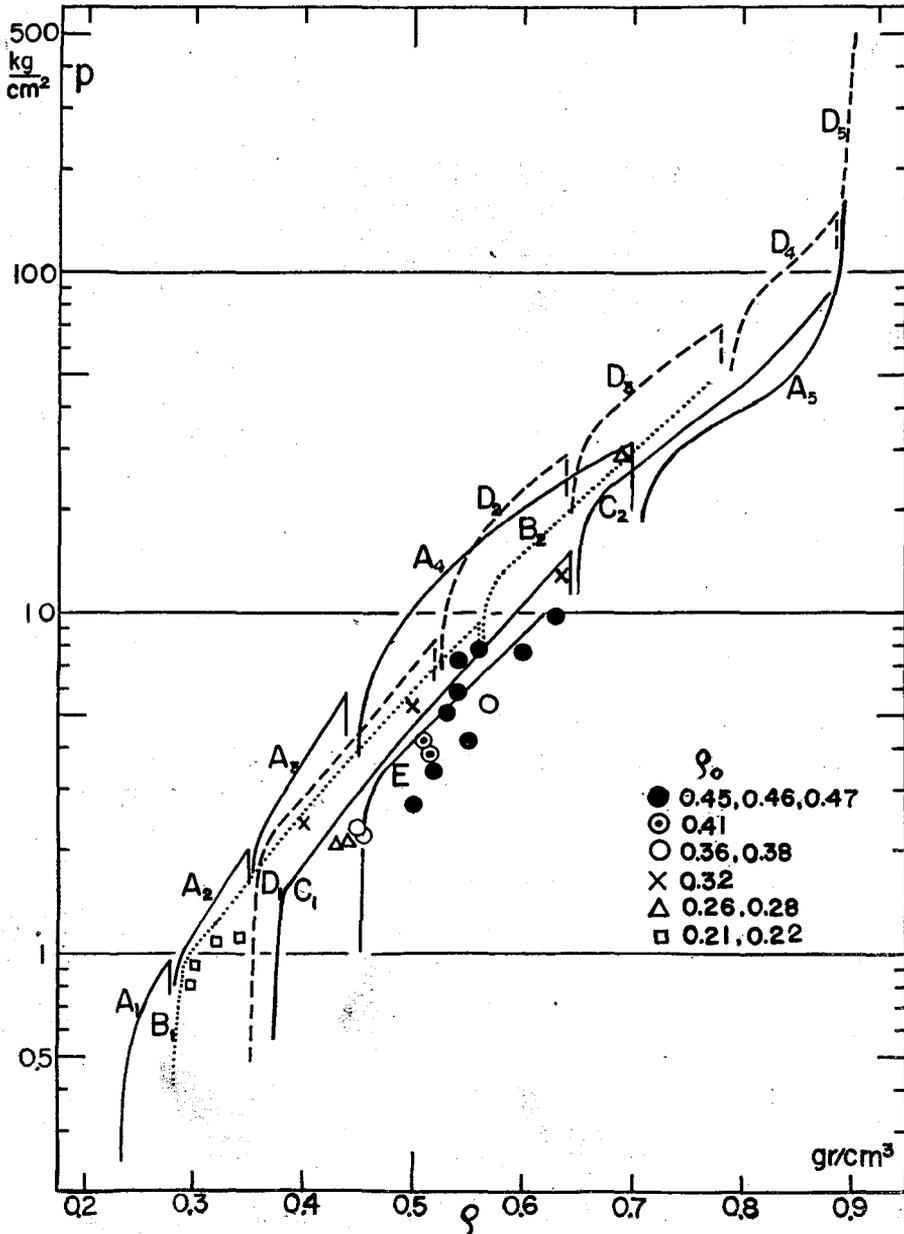
で表される斜な直線の近くにまとまる。ここで、 $p$ はkg/cm<sup>2</sup>、 $\rho$ はgr/cm<sup>3</sup>で表されている。(3)式のなりたつのは $\rho=0.85$ までの範囲で、 $\rho$ が0.9近くなると、 $p$ の $\rho$ による増大率は急激に大きくなる。

先に述べた5%塑性圧縮のときの $p$ と $\rho$ との関係(2)式による $p$ は、(3)式で与えられる $p$ よりも、同じ $\rho$ については、かなり小さい。たとえば、 $\rho=0.5$ では、(3)式の $p$ は5.6 kg/cm<sup>2</sup>、(2)式の $p$ は2.7 kg/cm<sup>2</sup>である。しかし、両方の $p$ については、そのときの圧縮歪 $\epsilon$ が違ふ。(2)式の場合は、 $\epsilon=0.05$ であるが、(3)式の場合は、 $\epsilon=0.5$ である。このような圧縮歪の違いが応力にどれだけの差異をもたらすかを、つぎに調べてみよう。

第5図の各曲線は、ほぼ(3)式で表されるとはいえ、互に離れている。そして、初めの密度 $\rho_0$ の小さい曲線ほど高い位置にある。すなわち、 $\rho_0$ が小さい雪ほど、同じ $\rho$ の値で、大きい応力 $p$ を現わす。たとえば、 $\rho=0.5$ では次のようになっている。

$\rho_0$	0.23	0.28	0.32	0.35	0.37	0.41	0.45	0.47
$p$	10	6	5.4	7	4.6	4.2	4.2	2.7
$\epsilon$	0.74	0.57	0.46	0.45	0.36	0.25	0.12	0.07

はじめの密度  $\rho_0$  が小さい雪ほど、同じ密度に達するまでの歪  $\epsilon$  が大きいから、うえのことは大きい歪をうけた雪ほど、大きい応力を示すということになる。同じ密度の雪でも、歪を大きくうけたものほど、内部の組織の乱れがひどく、それだけ硬化の程度も大きいといえるであろう。組織の乱れについては、次の第 III 節 (b) で述べる。



第 5 図 圧縮の際の応力  $p$  と密度  $\rho$  との関係

### III. 塑性圧縮による雪の組織の変化

#### (薄片による観察)

雪の柱を氷の板になるまで塑性圧縮する途中で、圧縮を数回中断し、その都度雪の柱の上部を厚さ5 mm程削りとり、薄片を作った。また、はじめの雪の組織をみるため、雪の柱を切りとった雪層からも薄片を作った。これらの薄片を顕微鏡観察することにより、雪の内部組織がどのように変化して氷の状態になるかを調べた。薄片の作成は、先に筆者及び若浜が考案したアニリン法<sup>7)</sup>によった。雪の柱は、圧縮方向が積雪の層に平行になるように採取され、薄片は、いずれも、圧縮された雪の柱の上部中心付近から、水平に(圧縮方向と垂直に)とられた。例外として、図版VIに、圧縮方向に切った薄片を示してある。これと、他の図版の写真と比べると、組織は、薄片を切る方向によって著しくは変らないことが解る。

#### (a) 初密度 $\rho_0=0.35$ のしまり雪の塑性圧縮

図版Iに、第3, 4, 5図のDの実験で得られた一連の薄片の写真を示す。この実験は、密度0.35のしまり雪の柱を、 $-18^\circ\text{C}$ で0.3~1.7 mm/minの速度で圧縮したもので、歪は最後に99.1%という大きな値にまで達した。はじめ高さが14.6 cmであった雪の柱が、最後には0.8 mmという極端に薄い氷の板になった。図版I-1, 2, 3, 4, 5, 6は、夫々、圧縮前、初圧縮、2回目、3回目、4回目、5回目の圧縮後の雪の柱からとった薄片の一部の写真である。圧縮歪 $\epsilon$ は、1で0, 2で0.51, 3で0.67, 4で0.87, 5で0.935, 6で0.991である。2, 3の薄片が、第I節(a)で述べた雪の柱がほぼ一様に圧縮される初期圧縮の段階の薄片であり、4, 5, 6の薄片が、第I節(b)で述べた雪の柱の内部と周辺部で、圧縮程度の違う後期圧縮の段階の薄片である。このときの薄片は、雪の柱の内部からとられた。

1, 2では空隙がかなりあるが、3, 4では常に少い。特に4では、空隙が氷でとざされ気泡の状態になっている。又、歪の非常に大きい場合の5, 6では、小さな気泡が雲のようにちらばっている。その組織は、1, 2では氷の網目組織、4では気泡の斑状組織、5, 6では気泡の雲状組織という言葉で表現するのが適當のようである。ただ、3では、氷の網目組織と気泡の斑状組織の中間の組織がみられる。つぎに各段階の組織について詳しく述べよう。

(1) はじめの雪( $\epsilon=0$ ,  $\rho_0=0.35$ , 応力 $p=0$ , 図版I-1) その組織は、不規則な網目結合であるが、この網目は多くの単結晶の氷にわかれている。以後この単結晶の氷のひとつひとつを氷粒とよぶことにする。筆者は先に野外に降り積った雪の組織が、日がたつにつれ、変態して行く過程について詳しく調べた<sup>7)</sup>。それによると、この網目組織はしまり雪の組織の一般的なものである。最大断面が薄片の厚さの中に含まれている氷粒に内接する円をかき、その直径 $d$ で氷粒の粒径を表す。粒径分布は、第6図(a)で表される。平均粒径 $\bar{d}$ は0.3 mmで、体積平均の粒径 $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$ は0.33 mmである。

(2) 圧縮歪 $\epsilon=0.51$ の雪( $\rho=0.52$ ,  $p=8.4 \text{ kg/cm}^2$ , 図版I-2) その組織は網目状には変りないが、圧縮前の薄片の写真図版I-1に比べると、いくつかの特徴的な組織の違いが目立つ。

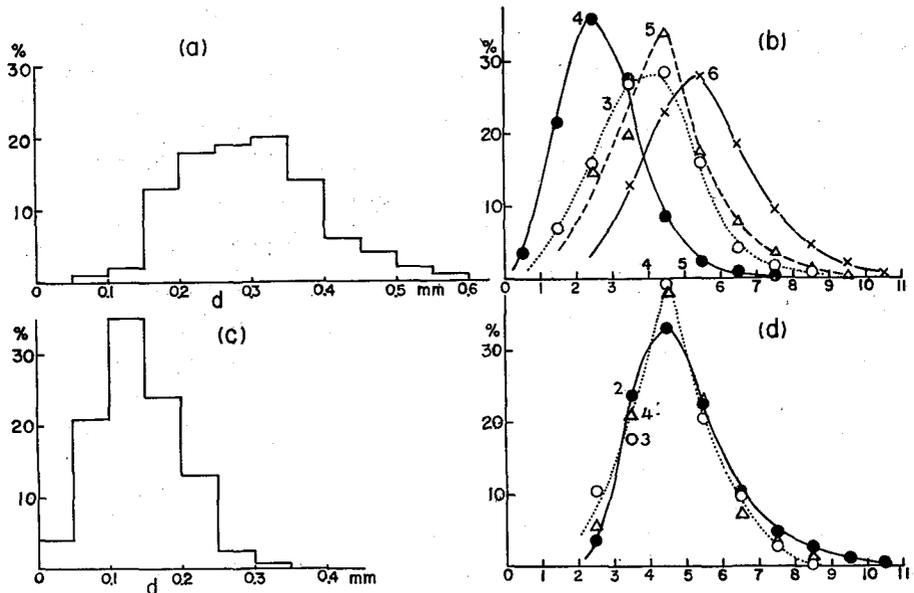
その例を写真2の中に、a, b, cの印で示す。

若浜<sup>9)</sup>は、顕微鏡の下で積雪の薄片を圧縮し、組織が変化して行く過程を直接に観察した。その実験では、歪が20%位までの圧縮が行なわれたのであるが、そのとき次のような組織の変化がみられた。すなわち、氷粒細胞化、接触による氷粒同士の融合、粒界の移動、粒内すべり(粗大すべり、微細すべり)等である。氷粒細胞化は、氷粒の内部に、少しずつ結晶軸方向を異にする数個の細かい結晶が出来ることで、図版I-2の場合でもaのところに現われている。このような小さな結晶は、大きさが20~80 $\mu$ で、これを氷細胞とよぶことにする。氷粒同士が接触すると、焼結によって融合し、その二氷粒間の境界面が結晶境界になる。図版I-2のbのところがそれであると考えられる。粒界が移動して曲っているのが、cのところにある。その他の組織変化によると考えられる模様も、薄片の中で数多くみられた。

(3) 圧縮歪 $\epsilon=0.67$ の雪( $\rho=0.64$ ,  $p=29$  kg/cm<sup>2</sup>, 図版I-3) 図版I-3の状態には、氷の部分の形からみても、網目組織という名称は適当でない。網目組織の図版I-1では単結晶が前後に列をなくして並んでいたが、図版I-3の状態では、ひとつの単結晶は前後左右、八方を他の単結晶で囲まれている。それで、以後は、空気によってではなく、氷で占められる部分を氷領域、氷領域内に含まれている個々の単結晶を氷結晶とよぶことにする。それにしても、写真3の組織は、なお、網目組織に多少似ている。氷領域の幅は平均0.4 mm位である。氷結晶の大きさは50~200 $\mu$ で氷粒よりは小さい。しかし、氷結晶は図版I-2の印aの氷細胞よりは大きい。図版I-3では、氷の自由表面同士が接触して融合したと思われるところが非常に多い。(印b)

図版I-3に現れている氷結晶の形は、氷結晶の一断面にすぎない。したがってその大きさは50~200 $\mu$ であるが、これは真の大きさではない。このような場合に、真の大きさを調べる方法としてジョンソンの方法<sup>9)</sup>がある。この方法では、面積が1, 2, 4, 8, 16, 32, ……と2倍ずつになっている数組の正方形の型を、写真上にあてはめて、各々の氷結晶がどの相隣る二組の間にはまるかを数える。そして、結局真の氷結晶の大きさ(直径とする)の体積分布曲線を推定するのである。図版I-3の薄片における氷結晶の直径分布は、第6図の(b)の曲線3で表される。このグラフの横軸は右側の方が直径の小さい方になっている。その左端の数字0は0.8 mmの直径に相当し、以下は1は0.565 mm, 2は0.4 mm, 3は0.283 mm, 4は0.2 mm, 5は0.14 mm, 6は0.1 mm, 7は0.07 mm, 8は0.05 mm, 9は0.035 mm, 10は0.025 mmの直径に相当する。この場合の体積平均直径 $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$ は0.20 mmである。はじめの雪の $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$ (0.33 mm)よりは、かなり小さい。

(4) 圧縮歪 $\epsilon=0.87$ の雪( $\rho=0.78$ ,  $p=70$  kg/cm<sup>3</sup>, 図版I-4) この組織は、もはや完全に網目状ではない。空隙が氷の中に斑点状に散在し、斑状組織を作っている。空隙の大きさは最大のものでも直径が0.4 mm位である。シュムスキー(文献10の267頁)は、氷河の断面の観察から、密度が0.8位で空気が氷の中に閉じこめられると云っている。この図版I-4では、密度が0.78なので、空気は殆ど氷の中に閉じこめられていると思われる。第I節によると、この



第 6 図 氷粒の粒径分布とジョンソン法による氷結晶の直径の分布  
(a), (b) 初密度 0.35 の雪, (c), (d) 初密度 0.23 の雪

- (a) はじめの雪の粒径分布。
- (b) 圧縮雪の水結晶直径の体積分布。曲線に附した番号の 3, 4, 5, 6 は夫々  $\epsilon=0.67, 0.87, 0.935, 0.991$  の圧縮雪の場合である。横軸の数字は次の下欄の数値の直径を意味する。

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.8	0.565	0.4	0.283	0.2	0.14	0.1	0.07	0.05	0.035	0.025 mm

- (c) はじめの雪の粒径分布。
- (d) 圧縮雪の水結晶直径の体積分布。黒丸印, 白丸印, 三角印に附した番号 2, 3, 4 は夫々  $\epsilon=0.655, 0.89, 0.977$  の圧縮雪の場合である。

段階では、雪の柱の内部と周辺部とで圧縮の程度が大分違う。後期圧縮の段階が進むと、空気が氷の中に閉じこめられるようになる。

氷結晶は図版 I-3 の場合に比べて大きい。その直径の体積分布は第 6 図 (b) の曲線 4 で表される。 $\sqrt[3]{d^3}$  は 0.31 mm で、写真 3 の場合 (0.20 mm) より大きく、はじめの雪の場合 (0.33 mm) にほぼ等しい。

氷の部分の内部には、直径数  $\mu$  から数拾  $\mu$  の小さな気泡が点在している。図版 I-4 で白い矢印 x をつけた気泡は結晶境界にあり、矢印 y をつけた気泡は結晶内部にある。この小さな気泡を大倍率で観察した写真を図版 II-1, 2, 3 に示す。その写真 1, 2, 3 は夫々厚さ 0.1 mm の薄片の同一範囲の上面, 内部 (上面より 0.054 mm 下), 下面を示す。それらの写真で、印 x をつけた気泡は結晶境界にあり、印 y をつけた気泡は結晶内部にある。写真 2 の x の気泡が薄片内部の結晶境界上にあることは、写真 1 の上面と写真 3 の下面に現れている結晶境界から判断さ

れる。上の二種類の気泡の生因については、次の第IV節で考察する。

(5) 圧縮歪  $\epsilon=0.935$  の氷 ( $\rho \approx$ 氷の密度,  $p=160 \text{ kg/cm}^2$ , 図版 I-5) 気泡が非常に小さくなり、薄片全体を雲のように蔽っている。その組織は雲状組織と云った方がよい。一般に氷と云われる状態である。大倍率でみた写真が図版 II-4 で、気泡の大きさは数  $\mu$  から数拾  $\mu$  である。先の図版 I-4 で大きくなった氷結晶は図版 I-5 では小さくなっている。その直径の体積分布は第6図(b)の曲線5で表される。 $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$  は  $0.18 \text{ mm}$  である。曲線3から曲線4へと、直径の大きい左の方に移ったのが、曲線5は逆に小さい右の方に戻っている。

(6) 圧縮歪  $\epsilon=0.991$  の氷 ( $\rho \approx$ 氷の密度,  $p=500 \text{ kg/cm}^2$ , 図版 I-6) はじめの雪の柱は、この段階で白っぽい氷の板になった。この氷の内部には無数の細かい気泡が分散していた。内部に含まれている気泡を大倍率でみた写真が、図版 III-1, 2 である。その1は厚さ  $0.18 \text{ mm}$  の薄片の上面から  $0.064 \text{ mm}$  下の内部の写真である。左上方に比較的大きないびつな形の気泡が集団をなしている。これは、一つの気泡がこの段階で分裂したことを想像させる。図版 III-2 は厚さ  $50 \mu$  の薄片の写真である。写真の右の方に直径  $1 \mu$  程度の非常に小さい気泡が結晶境界上に点々と並んでいるのが目立つ。

氷結晶は更に小さくなり、その直径の体積分布は第6図(b)の曲線6で表される。曲線6は曲線5よりも更に右に位置し、氷結晶が更に小さくなったことを示している。 $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$  は  $0.13 \text{ mm}$  である。

(7) 圧縮による氷結晶の直径の変化 塑性圧縮が進むにつれ、氷結晶の直径の体積平均  $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$  が密度  $\rho$  とともにどのように変わって行くかを、第7図の黒丸印で示す。印にそえた数字は、図版 I の写真の番号である。ただ、はじめの雪の印1の場合だけは氷粒の粒径の体積平均値を示す。

$\sqrt[3]{\bar{d}^3}$  は1から3までは小さくなるが、4で増大し、その後再び5, 6と小さくなる。すなわち氷の網目組織が保たれている間は、氷結晶は次第に小さくなって行くが、圧縮が進んで網目組織がくずれるに従い、氷結晶は大きくなる。そして、気泡が氷の中に斑状に分布するようになると、その後は、再び氷結晶は小さくなり気泡は氷の中に雲状に分布するようになる。

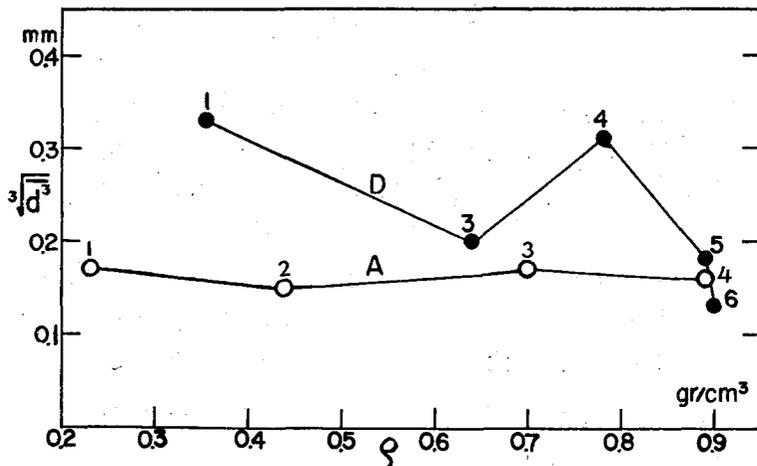
#### (b) $\rho_0=0.23$ の比較的軟かい雪の塑性圧縮

軟かい雪を塑性圧縮した実験で得られた各段階の薄片の写真を図版 IV に示す。この実験は、第3, 4, 5図のAで表されているもので、密度  $0.23$  の軟かい雪の柱を、歪  $\epsilon$  が  $0.977$  になるまで、塑性圧縮したものである。図版 IV-1, 2, 3, 4 の写真は、夫々、圧縮歪  $\epsilon$  が  $0, 0.655, 0.89, 0.977$  のときの薄片を示す。その組織は、1, 2 では氷の網目組織であり、3 では気泡が氷の中に斑状に分布する組織に近く、4 では気泡が氷の中に雲状に分布する組織になっている。組織変化の経過は、(a) 項の  $\rho_0=0.35$  のしまり雪を圧縮した場合と殆ど同じで、図版 IV-2, 3, 4 に現われている組織変化は、夫々、図版 I-2, 3, 5 に現われている組織変化によく似ている。しかし、よくみると、写真2同士では、図版 IV の方が結晶境界の数が多くしかも不規則な形で入りみだれている。すなわち、図版 IV-2 の方が図版 I-2 よりも組織変化の程度が強い。こ

のときの密度は、図版 IV-2 の方 ( $\rho=0.44$ ) が図版 I-2 ( $\rho=0.52$ ) より小さく、歪は、図版 IV-2 の方 ( $\epsilon=0.655$ ) が図版 I-2 ( $\epsilon=0.51$ ) よりも大きい。したがって、同じ位の密度なら、歪の大きい方が組織変化の程度が強いということになる。さらに、第 II 節(c)で、応力  $p$  は、同じ  $\rho$  のときには、はじめの密度  $\rho_0$  が小さいほど、すなわち  $\epsilon$  が大きいほど、大きいということを述べた。このことから、応力  $p$  は、組織変化の程度が強い方が大きいことになる。

氷を塑性圧縮させた若浜の実験<sup>11)</sup>によれば、塑性圧縮の程度が進むにつれ、氷の内部に発生する転位の数が多くなる。圧縮を更に進めるには、この転位を動かさなければならない。それだけ硬化の度合も進むことになる。雪の場合には、転位の数が多いほど氷粒表面に現われる変化が大きい。以上のことから、同じ  $\rho$  のときには、組織変化の程度が強いほど、すなわち  $\epsilon$  が大きいほど、 $p$  が大きいということが云われるのである。

図版 IV-1 の薄片の粒径分布、及び図版 IV-2, 3, 4 の薄片の氷結晶直径分布は、夫々、第 6 図の (c) 及び (d) の曲線 2, 3, 4 で表される。又、氷結晶直径の変化の様子は、第 7 図の白丸印で示される。このときの  $\sqrt[3]{d^3}$  は黒丸印ほど変化が大きくはないが、同じ傾向の変化を示した。



第 7 図 圧縮による氷結晶の直径の変化。黒丸印の 1, 3, 4, 5, 6 は夫々図版 I-1, 2, 3, 4, 5, 6 (第 3, 4, 5 図の D の実験) の薄片から得られたものである。白丸印の 1, 2, 3, 4 は図版 IV-1, 2, 3, 4 (第 3, 4, 5 図の A の実験) の薄片から得られたものである。附記してある数字は図版の写真の番号を示す。

#### IV. 組織変化の考察

第 III 節では、塑性圧縮によって雪の組織が、はじめの水が網目をなして結合する組織から、途中の気泡が氷の中に斑状に分布する組織を経て、最後の気泡が氷の中に雲状に分布する組織に到る経過を、圧縮の各段階の薄片の写真をあけて説明した。今までの写真は、すべて、

薄片の極めて小さな部分 (0.75 mm×1.1 mm~2.2 mm×3.3 mm) を示すものにすぎなかった。図版 V と図版 VI の写真は、薄片の各小部分を顕微鏡写真にとり、それらをつぎあわせたもので、圧縮初期の水の網目組織と、圧縮後期の気泡の斑状分布の組織を 6 mm×9 mm の広い面積にわたって示している。圧縮初期には、氷粒の網目結合が目立ち、空気が媒質になっているが、圧縮後期には氷で閉ざされた気泡の配列が目立ち、逆に氷の方がその媒質となり、その中に空気が分散した形になっている。このように、雪の組織変化は強いものである。雪から氷に変るまでの組織変化を、次の三つの段階にわけて考えると、便利である。すなわち、

**第 1 段階 (氷粒細胞化段階)** 密度が増大して 0.6 位になるまでの間である。氷粒の内部が多く細胞にわかれるとともに、氷粒の底面すべり、接触による氷粒融合、粒界移動等が起る。氷の網目組織はまだ保たれる。

**第 2 段階 (氷結晶成長段階)** 密度が 0.6 から 0.8 位になるまでの間で、氷細胞のうち安定なものが成長して氷結晶になり、更にそれが成長する。接触による氷粒の融合が頻繁で、空隙は閉じて粗大な気泡をつくり斑状に分布するに到る。

**第 3 段階 (氷結晶細分化段階)** 密度が 0.8 をこえる段階で、一度成長して大きくなった氷結晶が再び小さくなって行く。閉じた空隙すなわち粗大な気泡が分裂し、こまかい気泡となって、氷結晶内に雲状に分散する。この段階では、雪の柱の内部と周辺部とで、圧縮の度合の違いがはげしい。

第 8 図は、組織変化の上の三つの段階を模式的に示したものである。

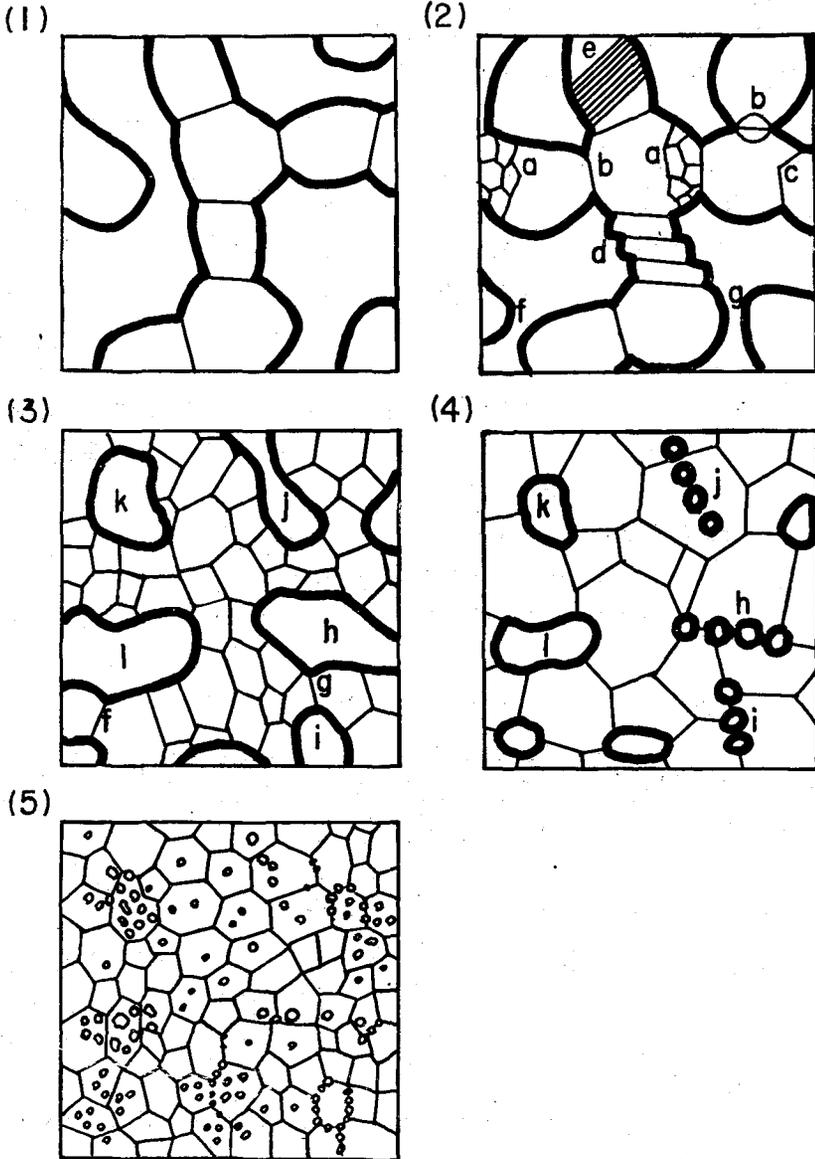
(1) は圧縮前の雪の組織で、小さい単結晶の氷粒がつながって、不規則な網目をなしている。図の中の太い線は氷と空気との境界で、細い線が氷粒間の結晶境界を表す。この氷の網目組織が、雪の柱の圧縮とともに、どのように変わって行くかを次に示す。

### 第 1 段階

(2) は第 1 段階の氷粒細胞化段階である。図版 I-2, IV-2, V がこの例である。組織にあらわれる変化の例を、第 8 図(2)の中の a, b, c, d, e の印で表す。a は細胞化によって出来た小さな氷細胞群で、この段階で最も目立つ組織変化である。細胞の大きさは 20~80 μ で、一つの氷粒の中に出来た細胞群の結晶軸は、母結晶の軸方向と少しづつ向きを異にしている。細胞化は次のようにして起ると考えられる。

積雪粒子内に起る一般的变化は底面迂りと粒界迂りであるが、迂り面である結晶底面にそって大きな剪断応力が働いても、その底面の端が隣接する氷粒との粒界で終わっている場合には隣接氷粒の妨害が大きくて、自由に迂ることができない。このような場合には、氷の結晶格子は粒界に近い部分で歪み、正規の結晶構造から外れた状態になる。この状態はエネルギー的に不安定なので、氷粒はいくつかのより小さな結晶粒に分れて、より安定な状態をとろうとする。この過程が氷粒の細胞化である。したがって、細胞化は一般に粒界或は粒界に近い所から始まる。

第 8 図(2)の b は、接触した氷粒の融合によって、新しい粒界が出来たところである。こ



第 8 図 組織変化の模式図。太い線が氷と空気との境界。細い線が結晶境界。

- 1 はじめの雪の組織。水粒の網目結合。
- 2 第 1 段階 (水粒細胞化段階)。網目組織は保れている。
- 3 第 2 段階 (氷結晶成長段階) の初期。
- 4 第 2 段階の終り。気泡が氷の中に斑状に分布する。斑状組織。
- 5 第 3 段階 (氷結晶細分化段階)。気泡が氷の中に雲状に分布する。雲状組織。

の融合は焼結<sup>12)</sup>によるものである。図の右側の b では、再結晶が現れている。若浜<sup>13)</sup>によれば二つの氷の単結晶を加圧接触させたときには、接触点から再結晶が起ることが多い。筆者の実験で、37%の圧縮歪をうけた雪の組織の中に、氷粒の接触点から再結晶が発生したと思われる顕著な例がえられた。その写真を図版 III-3 に示す。写真の b の印がそれである。

c は、氷粒間の結晶境界(粒界)が移動したところである。これは、相隣る二つの氷粒が応力をうけているとき、エネルギー的に安定な方が、他を喰って成長する途中に起るものである。

d は、粗大底面すべりで、すべりの階段の幅は 120~150  $\mu$  である。これの明瞭な例は、筆者及び若浜による英文報告<sup>14)</sup>の Fig. 27 に示しておいた。e は、微細底面すべりで、すべり線の間隔は 10  $\mu$  程度である。

再結晶やすべりによっても、氷の結晶は小さな領域に分割される。このようにしてできた領域も外見上は氷細胞と同じとみてよい。その意味で、この初期圧縮の段階を氷粒細胞化段階と名づけたのである。なお、この段階で起るこれらの変化の詳細については、若浜の論文<sup>9), 8)</sup>を参照されたい。

## 第 2 段階

第 8 図の (3) は、第 2 段階の氷結晶成長段階である。図版 I-3, 図版 IV-3 がこの例である。第 III 節 (a) の (3) 項で述べたように、この段階の組織は、もはや網目組織という名称に適しない。第 8 図の (2) で目立っていた氷細胞がなくなって、代りに多角形の氷結晶群が現れる。この氷結晶は、大きさが 50~200  $\mu$  で、氷細胞よりかなり大きい。ところで、この段階では、第 8 図の (2) よりも空隙が減少し、そのため氷粒同士の接触融合の機会が多くなる。(2) の空隙 f と g が (3) では融合して、一つの結晶境界になっている。(3) の f と g のように氷粒の接触融合によって出来る境界は必ず両端が空隙に達している。ところが (3) には、全境界が空隙に接しない多角形の氷結晶が多数みられる。このような結晶境界は、氷粒の接触融合によって出来たものではない。もともと氷粒内部に含まれていた氷細胞の成長によるものか、氷粒内部での再結晶によるものである。(2) の第 1 段階では氷粒内に、数ヶの氷細胞ができたのであるが、そのうちでエネルギー的に安定なものが、この第 2 段階で成長して、氷結晶になるのであろう。この意味で、この段階を氷結晶成長段階と名づけたのである。

第 8 図の (4) は、第 2 段階の終り頃で、空気が氷の中に閉じこめられる段階を示す。気泡が氷の中のおちこちに散在し、斑状組織を示す。図版 I-4, 図版 II-1, 2, 3, 図版 III-4, 図版 VI がその例である。氷結晶は成長して、はじめの氷粒よりも大きくなる。第 8 図 (3) で互に通じていた h, i, j, k の空隙は、(4) の h, i, j, k のように、氷で閉ざされた気泡になる。h, i, j では、数ヶの気泡が並んでいるが、これは次の経過で作られるのであろう。すなわち、(3) の氷領域の自由表面が、圧縮が進んだために互に接触するようになったとき、相互の接触面のこまかい凹凸のため、凸部同士が先に接触して、空隙が分断される。この分断された空隙がそのまま氷で閉ざされて気泡になるのである。こうして出来る気泡群は、まず結晶境界に点々と並ぶはずである。h, i の気泡群がそれである。この顕著な例が、図版 III-4 の印 x のところに現れて

いる。

第8図(4)のjの気泡群は、h; iと同じく点々と並んではいるが、結晶境界にはなく、結晶の内部にある。この気泡群は、h, iの気泡群と同じく、はじめ結晶境界にあったのであるが、結晶成長で境界が移動したために、結晶内部に取残されたのである。この顕著な例が図版 III-4の印yのところに見れている。その他の図版の中でyの印のついた気泡も、同じ経過で結晶内部に移ったものである。

第1段階や第2段階のはじめでも、氷の自由表面同士の接触がもとで、気泡群が作られるということが考えられる。しかし、それらの初期の段階では、薄片上で平面的にみると、いくつかの空隙に分割されているようにはみえても、まだ全体として空気の部分が多いので、その各空隙は互に通じていることが多い。そして、焼結によって、そのせばまった空隙は次第につめられて行く。ところが、圧縮がかなり進んで来ると、分断された空隙は互に通ずることなく、孤立する。こうなると、その孤立した空隙の中の空気は、もはや追い出されることなく気泡として残るのである。

### 第3段階

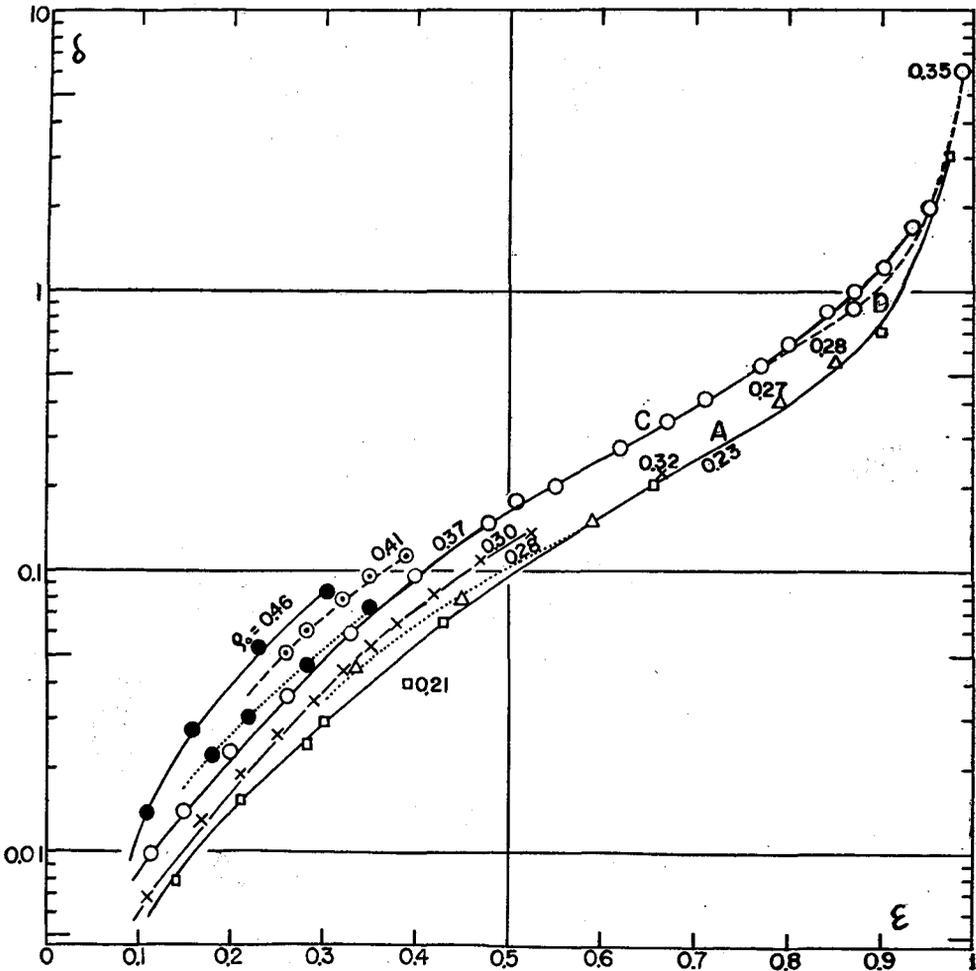
第8図の(5)は、第3段階(氷結晶細分化段階)を示す。図版 I-5, 6, 図版 III-1, 2, 図版 IV-4がその例である。第8図の(3), (4)の第2段階で大きくなった氷結晶は、この段階では小さくなる。気泡は、非常に小さい数多くの気泡群に分裂し、雲状組織を作るに到る。この段階で氷結晶が小さくなる現象は、第1段階の氷粒細胞化とは違う。第1段階の氷細胞群を、クロスニコルでみても、色の違いが殆どない。各細胞の結晶軸方向の違いは非常に小さい。ところが、この第3段階に現れる小さな氷結晶群を、クロスニコルでみると、夫々みな色が違ってみえる。したがって、一つの氷結晶がいくつかの小さな氷結晶に分れるのは、母体の氷結晶の中に再結晶が起ることによるものである。この意味で、この現象を細胞化と区別するため、細分化と名づけたのである。

## V. 圧縮の際のポアソン比

雪の柱を塑性圧縮すると、雪の柱は縮むとともに太くなって行く。その経過は第1図の写真の通りである。第1図では、(1)で柱の高さは13.8 cm, 直径は4.8 cmであるが、(3)では高さが4.6 cm, 直径が6.4 cmである。第1図の場合、(3)で一度圧縮を中止し、雪の柱を(4)のように細く削って、第2回の圧縮を始めた。この第2回目圧縮開始時の柱の高さ4.2 cm, 直径2.9 cmは、最後には高さ0.83 cm, 直径5.8 cmになった。いくつか行なった実験について、最初の柱の高さを $h_0$ , 直径を $D_0$ , 高さ $h$ まで縮んだときの直径を $D$ として、圧縮歪 $\epsilon=(h_0-h)/h_0$ と直径の増大率 $\delta=(D-D_0)/D_0$ との関係を第9図に示した。白丸をつなぐ実線Cが第1図の場合である。途中高さが $h_1$ , 直径が $D_1$ に達したときに、圧縮をとめ、雪の柱を削って、高さを $h_2$ , 直径を $D_2$ とした場合には、その後の $\epsilon$ と $\delta$ は、夫々、 $(h_0-h_1)/h_0=(h'_0-h_2)/h'_0$ ,  $(D_1-D_0)/D_0=(D_2-D'_0)/D'_0$ を満足する $h'_0$ と $D'_0$ とを基準にして、 $\epsilon=(h'_0-h)/h'_0$ ,  $\delta=(D-D'_0)/D'_0$ で表

される。したがって、第1図の場合には、最後に  $\epsilon=0.935$ ,  $\delta=1.67$  になったのである。さきに、第I節(e)で、柱の側面につけたインク印の横幅が、最後には1.7倍にのびたことを述べたが、このインクの印の伸びる率は、上の  $\delta$  に等しい。なお、第9図で一つの印だけで表されているのは、その実験の最終時の  $\delta-\epsilon$  関係を示す。

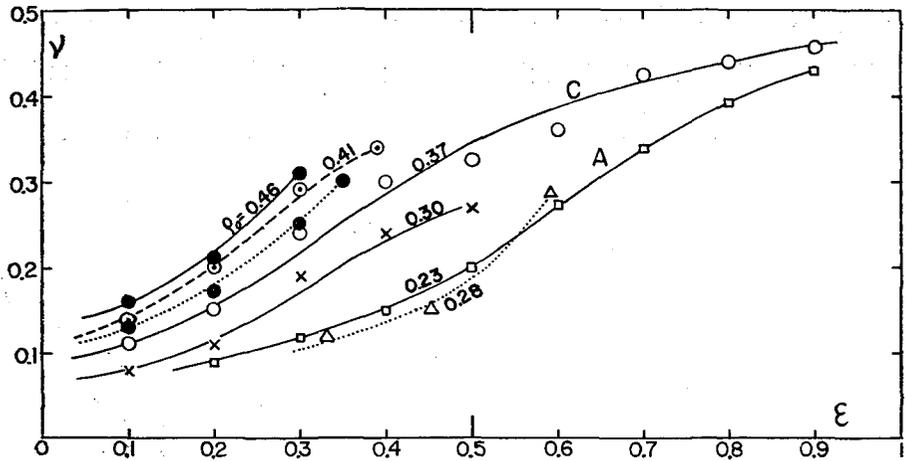
第9図で、曲線に附記してある数値は、その実験の初密度  $\rho_0$  である。 $\rho_0$  が大きいほど、同じ  $\epsilon$  に対する  $\delta$  が大きい。黒丸印は  $\rho_0=0.46$  のときの値であるが、それを実線で結んだのと、点線で結んだのと二つの曲線がある。同じ  $\epsilon$  に対しては、実線の方が  $\delta$  が大きい。両方とも実験の温度は  $-10^\circ\text{C}$  であるが、実線の方は圧縮速度が  $5.6\text{ mm/min}$  で、点線の方は  $1.3\text{ mm/min}$  である。圧縮速度の速い方が、直径の増大のしかたが大きい。又、 $\rho_0=0.35$  のDの白丸破線は



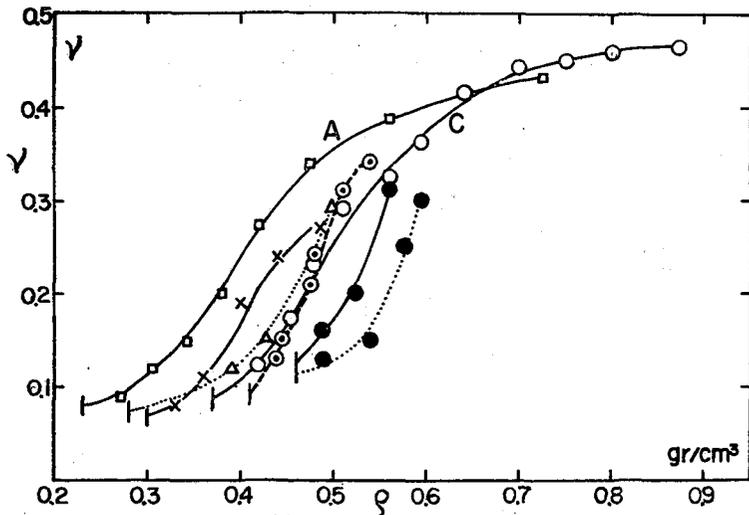
第9図 雪の円柱の圧縮による直径の増大率  $\delta(=(D-D_0)/D_0)$  と圧縮歪  $\epsilon(=(h_0-h)/h_0)$  との関係。A, C, Dは夫々第3, 4, 5図のA, C, Dに対応する。

先に第3, 4, 5 図の曲線 D 及び図版 I の薄片写真の実験で得られたものである。最終歪  $\epsilon = 0.991$  という非常に大きな値で、このときの  $\delta$  は 6.1 であった。

円柱を単純圧縮するとき、圧縮歪  $\epsilon$  に対する直径増大率  $\delta$  の比 ( $\delta/\epsilon$ ) をポアソン比  $\nu$  ということも出来る。もし、 $\epsilon$  と  $\delta$  が非常に小さいなら、円柱の体積の圧縮による変化率  $\Delta$  は、 $\Delta = \epsilon(1-2\nu)$  として与えられるが、いまの場合のように、 $\epsilon$ ,  $\delta$  が大きいと、この式は成立たない。しかし、圧縮の途中、柱の高さ、直径、体積が夫々  $h$ ,  $D$ ,  $V$  のとき、それぞれに  $dh$ ,



第10図 ポアソン比  $\nu (= \frac{h}{D} \cdot \frac{dD}{dh})$  と圧縮歪  $\epsilon$  との関係



第11図 ポアソン比  $\nu$  と密度  $\rho$  との関係。各曲線の左端の棒は初密度  $\rho_0$  を表す。

$dD$ ,  $dV$  の変化が起つたとし,  $\epsilon = -dh/h$ ,  $\delta = dD/D$ ,  $\nu = \delta/\epsilon$  とすれば, 体積の変化率  $\Delta = dV/V$  は, 上と同じ式  $\Delta = \epsilon(1-2\nu)$  で与えられる。  $\nu = 1/2$  なら, 体積増大率は 0 であり,  $\nu$  が  $1/2$  より小さいほど, 体積増大率は大きい。第 10 図は  $\nu = (-dD/D)/(dh/h)$  と  $\epsilon = -(h-h_0)/h_0$  との関係を示す図である。この場合, 横軸の  $\epsilon$  としては,  $-dh/h_0$  をとつてもよいのであるが, 圧縮の途中の状態を示す目的で  $(h_0-h)/h_0$  の方を選んだ。  $\nu$  は  $\epsilon$  が大きくなるとともに増大する。  $\epsilon$  が 0.1 以内のときには 0.08~0.15 という小さな値であるが, 曲線 A や C のように  $\epsilon$  が 0.9 近くになると, 0.5 に近づく。又, 同じ  $\epsilon$  に対しては,  $\rho_0$  が大きいほど,  $\nu$  が大きい。

第 5 図で応力  $p$  と密度  $\rho$  とのグラフを書いたが, ここでも  $\nu$  と  $\rho$  の関係のグラフを作ってみると, 第 11 図のようになる。  $\rho$  が 0.6 位までは, 同じ  $\rho$  に対しては,  $\rho_0$  が小さいほど,  $\nu$  が大きい。(各曲線の左端が  $\rho_0$  を表す。)  $\rho_0$  が小さいほど, 歪  $\epsilon$  が大きく, 組織の変化のうけかたも大きい。  $\nu$  が大きいということは, 体積変化の度合いが小さいということである。組織変化をよけうけている方が, 硬化の度合いも進み, それだけ体積変化が小さいわけである。  $\rho$  が大きくなって 0.7 以上になると,  $\nu$  の値は  $\rho_0$  のいかに拘らず, ほぼ 0.45 を保つ。そのときは, 雪の柱の内部と周辺部とで, 圧縮の度合いが違っている。

## VI. 自然積雪・氷河との比較

自然に野外につもる雪は, その重みで塑性的に圧縮が行なわれ, 密度がまして行く。一度もとけたことのない積雪では, 普通深さ 2 メートルの層の密度は, 0.45 位である。そして, その層がうけている圧力は, 大体  $70 \text{ gr/cm}^2$  である。ところが, この実験の塑性圧縮の場合には  $\rho = 0.45$  では, 応力が  $2 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$  である。又, 長年月にわたって塑性圧縮が行なわれ, 遂に氷にまでなるのが, 氷河であるが, 氷河について, 深さと密度との関係を, シュムスキー<sup>15)</sup>は, ゴルゲ, ベーダーの研究<sup>16)</sup>を基にして, 理論的に計算している。それによると, 深さ 50 メートルで  $\rho = 0.79$ , そのときうけている圧力は  $3.5 \text{ kg/cm}^2$ , 又深さ 100 メートルで  $\rho = 0.88$ , そのときうけている圧力は,  $8 \text{ kg/cm}^2$  である。筆者の実験では,  $\rho = 0.79$  のときには,  $p = 40 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\rho = 0.88$  のときには,  $p = 80 \sim 140 \text{ kg/cm}^2$  である。積雪も, 氷河も, ともに塑性圧縮であるのに, 筆者の実験の塑性圧縮に比べると, 圧力が非常に小さい。実験では圧縮に要する時間が高々数時間であるのに, 自然積雪や, 氷河では, 数拾日もしくは数拾年という長期間である。積雪<sup>7)</sup>や氷河<sup>18)</sup>の組織を調べた報告をみると, 筆者の実験でみられるような複雑な組織変化がみられない。筆者の実験では, 圧縮が速いために, 内部組織に強い変化が起るのである。そのため硬化がはげしく, 積雪や氷河よりも遙に強い圧力が現われるものと思われる。

## VII. 定荷重放置による氷粒の成長

塑性圧縮で得られた多結晶氷に一定の荷重をかけて放置すると, その氷結晶が大きくなることが観察された。第 1 図の写真の最終の試料のほぼ中央から, 断面  $1.85 \text{ cm} \times 1.85 \text{ cm}$ , 厚さ  $8.3 \text{ mm}$  の氷の薄板を切りとり, 再び万能試験機にかけて  $0.1 \text{ mm/min}$  位の速度でゆっくりお

した。試験機の圧縮板が試料上面に達して圧縮が始まってから1分後には、力が400 kgに達した。ここで圧縮速度を調整して、その後は一定の400 kgに保たれるようにした。一定荷重400 kgで40分間放置したら、試料の厚さは3.4 mmに減少していた。しかし、断面積の方はほぼ3.1 cm×3.1 cmにふえていた。したがって、圧力ははじめの1分半で0から120 kg/cm<sup>2</sup>にまで増し、その後は次第に減少して、最後には42 kg/cm<sup>2</sup>になったわけである。このときの実験の温度は-10°Cであった。図版VII-1は力をかける前の、図版VII-2, 3, 4が力をかけて放置した後の試料の組織の写真である。放置後の方が氷結晶が大きい。力をかける前の直径分布は第12図の黒丸印で、放置後の直径分布は白丸印で表される。体積平均の直径 $\sqrt[3]{\bar{d}^3}$ は、前者が0.18 mm、後者が0.32 mmである。一定の力のもとに放置したために、直径はほぼ2倍に増大した。

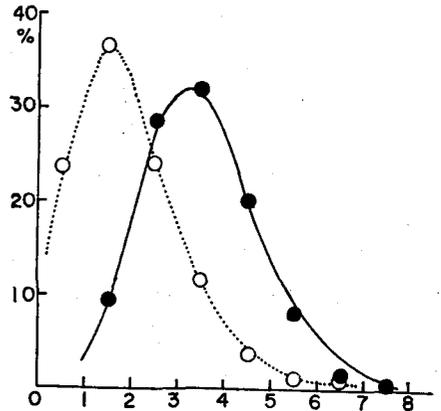
図版VII-2, 3, 4は、夫々、放置後の薄片の同一個所の上面、その0.056 mm下、及び下面(上面から0.15 mm下)の写真である。2の左上方で、結晶境界が大きく弯曲している。又、4のほぼ中央に再結晶の芽らしいのがみえる。気泡は数個が一線に並んでいるのが目立つが、結晶境界にあるものは殆どない。第IV節で述べたように、粒成長のための粒界移動で、結晶内に残されたのであろう。

塑性圧縮の度合が非常に進んで、なお応力が増しつつある段階では、氷結晶が細分化することを第III, IV節で述べた。しかし、この実験のように、その段階の多結晶氷を、定荷重で放置すると、氷結晶が大きくなるのが解った。氷河では、底の方に直径が数拾cmの大きな単結晶がみつけれられているが、この定荷重放置の実験と同じような過程で、氷河の中で大結晶がつくられて行くものと思われる。

終りに、この研究に際し色々御指導をいただいた吉田順五教授、又種々御助言をいただいた低温科学研究所雪氷研究グループの方々に厚く感謝の意を表します。なお、この研究に要した費用の一部は、文部省科学研究費によるものである。

#### 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.



第12図 定荷重放置による氷結晶の成長. 白丸印は放置前, 黒丸印は放置後の氷結晶の直径の体積分布(ジョンソン法<sup>9)</sup>による)を示す。

- 4) Hill, R. 1950 The Mechanical Theory of Plasticity. Oxford at the Clarendon Press.
- 5) 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.
- 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) 木下誠一 1960 積雪層の組織の変態過程. 低温科学, 物理篇, **19**, 111-118.
- 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) Johnson, W. A. 1946 Estimation of spatial grain size. Metal Progress, **49**, 87-92.
- 10) Шумский, П. А. 1955 Основы Структурного Ледоведения. Академия Наук СССР. Москва.
- 11) 若浜五郎 1961 水の塑性変形について II. 低温科学, 物理篇, **20**, 77-100.
- 12) 黒岩大助 1960 積雪の Ice-Bonding にもなう弾性率, 内部摩擦の変化, ならびに氷の焼結機構に関する研究. 低温科学, 物理篇, **19**, 1-36.
- 13) 若浜五郎 未発表.
- 14) Kinoshita, S. and Wakahama, G. 1960 Thin sections of deposited snow made by the use of aniline. Contributions from the Institute of Low Temperature Science, **15**, 35-45.
- 15) Shumsky, P. A. 1960 Density of glacier ice. Journ. of Glaciology, **3**, 568-573.
- 16) Bader, H. 1954 Sorge's law of densification of snow on high polar glaciers. Journ. of Glaciology, **2**, 319-323.
- 17) Fuchs, A. 1959 Some structural properties of Greenland snow. SIPRE Research Report, No. 42, 1-24.
- 18) 中谷宇吉郎 1958 グリーンランド氷冠の粘弾性. 科学, **28**, 7-13.

### Résumé

A snow cylinder contracts plastically without breaking provided it is compressed at a constant speed  $v$  which lies below a certain critical speed  $v^*$  (References 1, 2 and 3). The series of photographs in Fig. 1 illustrates the shortening process of a snow cylinder (snow density  $\rho$ : 0.37, temperature  $T$ :  $-9^{\circ}\text{C}$ , contracting speed  $v$ : 1.0~1.8 mm/min) during an extremely large plastic compression. As long as the degree of contraction  $\epsilon = (h - h_0)/h_0$  ( $h_0$ : initial height of cylinder,  $h$ : height of cylinder in the compressed state) remained below 0.6, the cylinder contracted uniformly over its whole length (Fig. 1, Photos. 1, 2, 3). After this uniform contraction, the snow cylinder was made thin as shown in Fig. 1 by shaving off the side surface so it could be subjected to a much larger compression. With the further compression, the upper and lower ends of the side surface of the cylinder began to turn inwards to come into contact with the compressing plates, which is shown in Photos. 4, 5, 6, 7 by the disappearance of the ink-marks positioned near the top and bottom of the side surface. On the other hand, the remaining portion of the side surface began to expand sideways without undergoing contraction; the spaces between the ink-marks on the side surface remain unchanged in Photos. 4, 5, 6 and 7. The compression was continued until the snow cylinder became a thin ice slab (Photo. 7), when the degree  $\epsilon$  of compression was as high as 0.935.

The curves in Fig. 4 show the relation between  $\epsilon$ , the degree of contraction, and  $p$ , the resistive force exhibited by snow cylinders against compression. The curves are cut in places; the compression was interrupted at those places in order to take from the snow cylinders thin sections for microscopic inspection of their fine texture. In Fig. 5,  $p$  is

plotted against  $\rho$ , the density of the snow increasing with the compression. As long as  $\rho$  does not exceed 0.85, the relationship between  $p$  and  $\rho$  can be given by

$$\log_{10} p = -1.1 + 3.7 \rho,$$

when  $p$  and  $\rho$  are counted respectively in units of  $\text{kg}/\text{cm}^2$  and  $\text{gr}/\text{cm}^3$ .

As stated above, each time the compression was interrupted, a thin section was cut horizontally from the uppermost portion of the cylinder in order to see how the fine texture of the snow changed with increasing contraction. The series of photographs in Pl. I shows an example of the course of the change in fine texture. The character of the network seen in the texture of the initial snow (Pl. I-1) is preserved until the snow cylinder is contracted to less than half its initial height (Pl. I-3). But, after that, the portions of the ice network unite themselves to make a mass of ice with the result that the air space remains in it as individual voids as shown in Pl. I-4. Then finally, those air spaces are divided into numerous small air particles which are scattered within the mass of ice like clouds (Pl. I-5, 6).

The whole course of the above described change in texture can conveniently be divided into the following three stages.

*First stage—stage of cell formation within ice grains* (Pl. I-2, 3; Fig. 8-2, 3). During the first period of compression in which the snow is compacted up to the density of about 0.6, the single ice crystals composing the ice network are divided into many small cells as seen in Photos. I-2, 3. There are several ways in which new boundaries are formed to make cells. In the schematic picture of Fig. 8-2, the cells (20–80  $\mu$ ) marked **a** are made by the formation of small angle boundaries; the cells appear almost of a uniform colour under a polarising microscope. The cells marked **d** and **e** are made by slips on the basal planes of ice crystals. At points **g** and **f**, two ice grains are going to come into contact and if they actually do they would make such a boundary as marked **b**. The clear-angled boundary **c** resulted from the migration of an ordinary boundary found in the original ice network of Fig. 8-1.

*Second stage—stage of crystal growth* (Pl. I-3, 4; Fig. 8-3, 4) One sees that the ice grains in Pl. I-4 are larger than those in Pl. I-3, which means that some of the ice grains grew at the sacrifice of the others during the compression between the time of the two photographs. Such a growth of crystals goes on until the density of the snow becomes as large as 0.8.

*Third stage—stage of crystal division* (Pl. I-5, 6; Fig. 8-5). When the mass of ice into which the snow has changed in the previous stage is still further compressed, the ice grains begin to break up into smaller units as seen in Pl. I-5, 6. This crystal division is probably due to the appearance of new crystals by recrystallisation.

Let  $h$  and  $D$  denote respectively the height and diameter of the snow cylinder at any moment while it is under compression. Then the ratio  $(dD/D)/(-dh/h)$  may be called Poisson's ratio  $\nu$  at that moment. In Figs. 10 and 11  $\nu$  is plotted respectively against  $\epsilon$  and  $\rho$  which increase with the increasing compression. The value of  $\nu$ , being as small as 0.1 at first, increases to approach 0.5 which is generally assumed as the value of  $\nu$  in the theory of plasticity.

図版説明

図版 I 雪の組織の変化過程

1. はじめの雪。密度  $\rho=0.35$  のしまり雪。氷粒の網目結合。
2. 歪  $\epsilon=0.51$ ,  $\rho=0.52$ 。a は氷細胞, b は氷粒融合部分, c は移動した粒界。
3.  $\epsilon=0.67$ ,  $\rho=0.64$ 。
4.  $\epsilon=0.87$ ,  $\rho=0.78$ 。x は結晶境界にある気泡, y は結晶内部にある気泡。気泡が氷の中に斑状に分布する。
5.  $\epsilon=0.935$ , 氷の状態。気泡が氷の中に雲状に分布する。
6.  $\epsilon=0.991$ , 氷の状態。気泡が氷の中に雲状に分布する。

図版 II

1.  $\epsilon=0.87$ ,  $\rho=0.78$  の図版 I-4 と同じ薄片の上面。x は結晶境界にある気泡。
2. その薄片の上面から 0.054 mm 下の内部。y は結晶内部にある気泡。
3. その薄片の下面 (薄片の厚さ 0.1 mm)。
4.  $\epsilon=0.935$ , 図版 I-5 と同じ薄片。

図版 III

1.  $\epsilon=0.991$ , 図版 I-6 と同じ薄片の内部における気泡の状態 (上面より 0.06 mm 下の内部, 薄片の厚さ 0.8 mm)。
2.  $\epsilon=0.991$ , 図版 I-6 と同じ薄片 (薄片の厚さ 0.05 mm)。倍率は 1 と同じ。
3.  $\epsilon=0.37$ ,  $\rho=0.43$ 。b は氷粒融合部分に発生した再結晶。
4.  $\epsilon=0.85$ ,  $\rho=0.79$ 。x は結晶境界に並ぶ気泡群。y は結晶内部に並ぶ気泡群。空気が氷の中に斑状に分布している組織。

図版 IV 雪の組織の変化過程

1. はじめの雪。密度  $\rho=0.23$  の軟かい雪。氷粒の網目結合。
2.  $\epsilon=0.655$ ,  $\rho=0.44$ 。
3.  $\epsilon=0.89$ ,  $\rho=0.70$ 。
4.  $\epsilon=0.977$ , 氷の状態。気泡が氷の中に雲状に分布する。

図版 V 圧縮初期の組織。氷の網目組織。 $\epsilon=0.51$ ,  $\rho=0.52$ 。図版 I-2 と同じ薄片。

図版 VI 圧縮後期の組織。気泡が氷の中に斑状に分布する。 $\epsilon=0.85$ ,  $\rho=0.79$ 。図版 III-4 と同じ薄片。

図版 VII 定荷重放置による氷結晶の成長

1. 放置前の多結晶氷薄片。第 1 図 (7), (8), (9) の氷の板の内部からとったもの。
2. 放置後の多結晶氷薄片の上面。
3. 同じ薄片の上面から 0.056 mm 下の内部。
4. 同じ薄片の下面 (厚さ 0.15 mm)。

