



Title	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
Author(s)	若浜, 五郎; WAKAHAMA, Gorow
Citation	低温科学. 物理篇, 19, 73-95
Issue Date	1960-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17968
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p73-95.pdf



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 —

若 浜 五 郎

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 35 年 8 月受理)

I. ま え が き

前報告 I¹⁾では、長方形の積雪を一定の静荷重で薄片の面に平行に圧縮し、匍匐(クリープ)にともなう積雪の顕微鏡組織の変化を連続的に追跡した。応力は一定かつ一様であるにもかかわらず、積雪は一樣には変形せず、局部的に大きな変形をおこすところと、わずかしか変形しない部分があり、それが、組織の弱い部分(弱線)と強い部分(基本領域)にそれぞれ対応していることがわかった。以上の匍匐実験にひきつづき、一定速度で薄片を圧縮しつつ応力の増加を記録して、硬化曲線を求める実験も行なつたので、その結果をここに報告する。しかし、実験の主な目的は、硬化曲線を求めることよりも、圧縮にともなう顕微鏡組織の変化の観察にあつた。この定速度圧縮法には、匍匐実験とくらべて、次のような相違あるいは特徴がある。

(1) 試料に生ずる歪は一定速度で増加する。匍匐実験では、歪速度はしだいに減少した。

(2) 変形とともに、応力は一定でなくしだいに増大する。匍匐実験では応力は時間的に変化しなかつた。試料が示す反抗力の増大を連続的に記録して歪-応力曲線をえれば、積雪の加工硬化がしらべられる。

(3) 報告 I でのべたように、匍匐実験では大きな力をかけることが難しく、 0.4 gr/cm^3 程度の密度の大きなしまり雪の薄片でも最大 300 gr-wt/cm^2 くらいの応力までしか加えられなかつた。これに反し小さな一定速度で圧縮すれば応力を 1 kg-wt/cm^2 以上にまで増大させることができる。

(4) 歪があまりに小さくは組織の変化の観察に不便なことはもとよりだが、また、あまりに歪を大きくすると薄片が破壊してしまう。だいたい圧縮歪 15% 以下が適当である。匍匐実験では 15% の歪に達するのに 3 日ないし 7 日を要するが、定速度圧縮ならば数時間で済む。

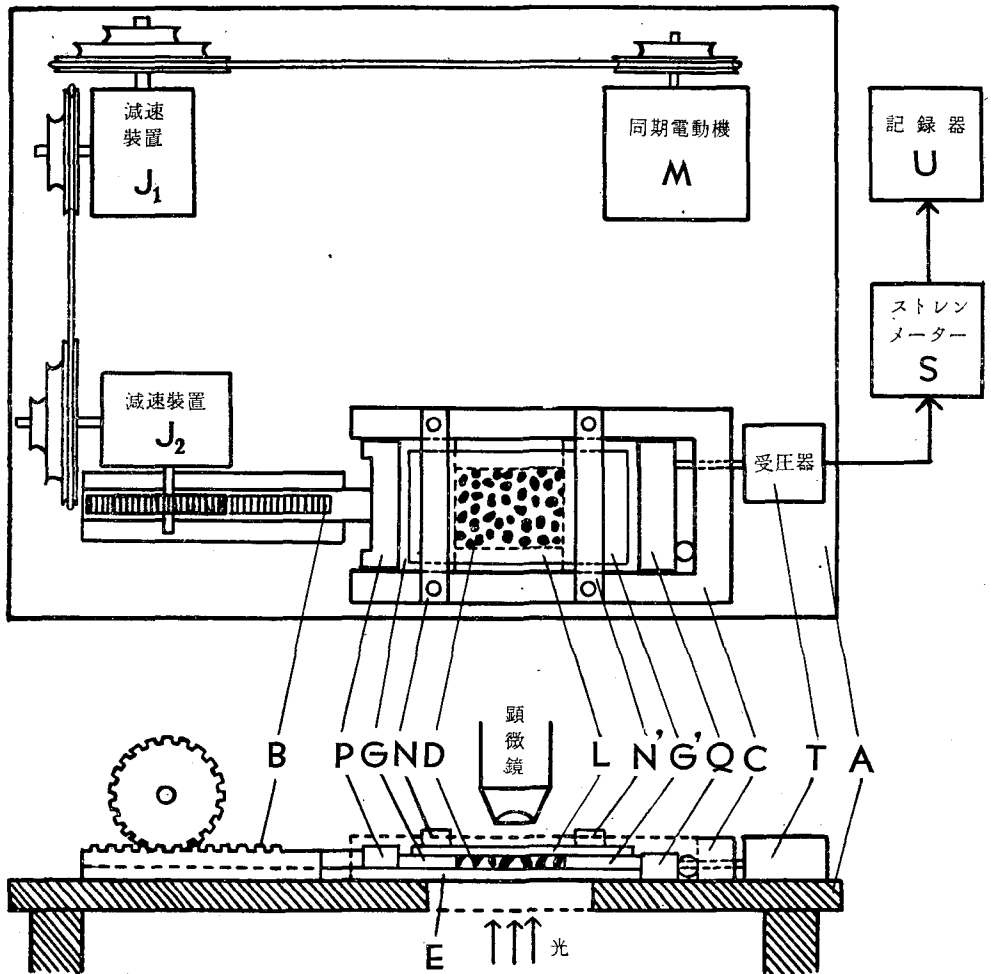
前回の匍匐実験の報告では、組織変化のうち、積雪を構成する氷粒子の外形、相互の関係位置など、幾何学的変化を主な研究の対象とした。その結果、さきののべたような「弱線」が発見されたわけである。今回の定速度圧縮実験も、幾何学的変形からポアソン比を求めたり

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 577 号

はしたが、観察の主眼は氷粒子の内部におこる変化においた。

II. 実験の方法と装置

積雪の薄片試料を一定速度で圧縮する方法は、木下²⁾が積雪柱を圧縮した方法と原理的には同じものである。第1図に積雪薄片の定速度圧縮装置を略図で示した。実験は $-8^{\circ}\sim-12^{\circ}\text{C}$ の低温実験室内で行なわれた。積雪薄片はアニリン法で作つたもので、圧縮実験中、氷粒子の間隙は、すべてアニリン液で満たされている。



第1図 積雪の薄片を定速度で圧縮する装置の略図

A; 薄片をのせる台。B; 圧縮板Pを前進させるためのラック。C; 真鍮のわく。D; 薄片。E; 薄片Dをのせるガラス板。G, G'; 厚さ0.6~0.7mmのガラス板。J₁, J₂; 減速装置。L; 薄片Dにかぶせるスライドガラス。M; 同期電動機。N, N'; スライドガラスLをおさえる金属片。P; 圧縮板。Q; 金属片。S; ストレインメーター。T; 線歪型受圧器。U; 記録器。

厚さ 0.6~0.7 mm の積雪の薄片を作り、まず、その全体を顕微鏡写真にとる（薄片各部の顕微鏡写真は引伸ばしたのち、つなぎ合わせて、薄片全体を示す顕微鏡写真とする。そのつぎあわせ方については前報告 I で述べた）。薄片 D の両側に、厚さが薄片と同じ 0.6~0.7 mm のガラス板 G, G' をおき、丈夫なスライドガラス L をかぶせて、薄片をガラス板 E, G, G', L の間にすきまなくはさむ。この操作は、特に注意深く行なわないと、薄片をこわし易い。薄片をのせたガラス板 E を、圧縮台 A にとりつけたわく C の中におく（圧縮台に関しては報告 I を参照）。わく C に、2本の細長い金属片 N, N' をねじでとめると、N, N' の下面が薄片にかぶせたガラス板 L の上面に軽く接触する。このようにして、板 L をおさえておかないと、圧縮が進むにつれて薄片は挫屈をおこし中央部がもりあがつて曲つてしまう。1分間に1回転する同期電動機 M は、2段の減速装置 J₁, J₂ を介して、ラック B を薄片に向つて徐々に前進させる。ラック B の先端は圧縮板 P を押し、P はスライドガラス G を介して薄片を圧縮する。P の前進速度は 0.005~1 mm/min の間の、いくつかの一定値に保つことができるように設計してある。圧縮が進行するとともに、薄片はガラス板 G' および金属片 Q を介して線歪型受圧器 T の受圧部を押し。薄片に加わる力（薄片が示す反抗力）はストレンメーター S に直接表示されると同時に、S に連結した記録器 U によつて連続的に記録される。金属片 Q の下面にはベアリングの球をうめこんであるので、Q と台 A との摩擦はほとんどない。金属片 Q は、図に示したように、受圧器の先端とベアリング用の球で受けているので、積雪に実際に加わつた力（薄片が示す反抗力）の 1/2 が記録されることになる。

圧縮の進行中、薄片のある一部分に着目してその部分の変化を偏光顕微鏡の下で調べるなり、あるいは、薄片全体を写真にとり、薄片全体に生じた組織変化を観察した。圧縮は変形が 10~25% に達したときに中止した。

III. 積雪のポアソン比

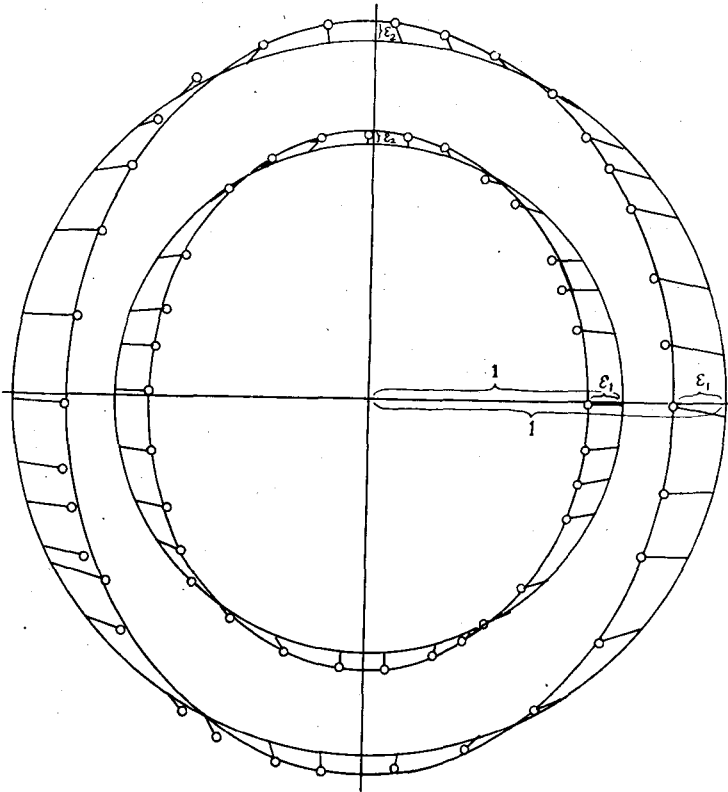
積雪の柱に一軸性の力を加えて弾性的に圧縮すると、積雪は横方向に幾分ひろがる。この場合、圧縮方向と横方向との主歪の比が積雪のポアソン比である。Landauer³⁾ は、密度が 0.4~0.5 の積雪のポアソン比として 0.16~0.19 を得ている。しかし、積雪がうける変形は、多くの場合大きな変形で、塑性変形である。したがつて、小さな弾性歪に関する元来の意味でのポアソン比よりも、塑性変形に関するポアソン比の方が実用的な意味は大きい。塑性変形の場合のポアソン比、すなわち塑性ポアソン比は、変形中のある瞬間の状態を基準とし、それにつづく微小変形における主歪の比として定義される。しかし、実際には各瞬間ごとの主歪の比を求めることは困難なので、通常は試料にある一定量の変形を与えたとき、その変形に関する主歪からポアソン比を求める。最近小島⁴⁾ は斜面につもつた雪の流れから、密度が 0.2~0.3 の雪の塑性ポアソン比を求め、0.2~0.3 の値を得た。筆者は、積雪の薄片の定速度圧縮から積雪の塑性ポアソン比を求めたので、以下それについてのべる。

前報告 I でのべたように、積雪の組織は強い部分（基本領域）が弱い部分（弱線）で囲まれ

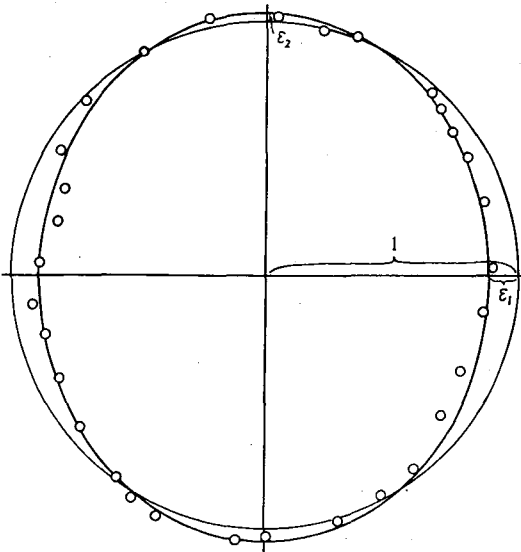
た円粒構造で、不均質な組織である。したがって、積雪の小さな部分、とくに弱線附近の組織に着目したばあいは、近似的にも組織を均質なものとみることができない。しかし、多数の基本領域を含む広い範囲を考えれば、その全体は均質、等方なものと考えることができる。それで、2~3 cm 角の積雪の薄片の面の上にてできるだけ大きな円を考え、薄片の圧縮にともなう氷粒子の変位によつて、この円がどのような形に変わるかをしらべた。円の変形は、円周上にある氷粒子の移動を顕微鏡写真で定めれば容易に求められる。あとでのべるように円は楕円に変わった。この楕円を歪楕円とよぶ。歪楕円の長軸、短軸の長さをそれぞれ a 、 b とし、はじめの円の半径を c とすれば、圧縮方向の主歪は $\epsilon_1 = (c-b)/c$ であり、圧縮に垂直な方向の主歪は $\epsilon_2 = (a-c)/c$ である。したがって、 $\nu = \epsilon_2/\epsilon_1 = (a-c)/(c-b)$ が塑性ポアソン比となる。

薄片が紙面内にあるとし、左右から水平方向に圧縮し、水平方向の圧縮歪として ϵ_1 を与えたとしよう。薄片の上辺と下辺とに近く水平な直線をかいておき、このふたつの平行直線の圧縮によるひろがりをはかれば、上下方向、すなわち、圧縮に垂直な方向の歪 ϵ_2 が求められる。したがって、 ϵ_2/ϵ_1 をもつて塑性ポアソン比としてもよいわけである。しかし、水平方向に圧縮する意図のもとに実験を行なつても、薄片の左右の側面と圧縮板との接触が均一でなければ、現実に薄片のなかに生ずる主応力の方向が水平、垂直になるとはかぎらない。実際の圧縮は水平方向と傾いた方向におこるかもしれない。そのようなときには、平行直線を用いる方法で定めた ϵ_1 、 ϵ_2 は主応力方向の歪ではなく、その比 ϵ_2/ϵ_1 は正しいポアソン比を与えない。しかし、はじめにのべた円を使う方法ならば、現実の圧縮が水平方向から外れると、歪楕円の主軸もまた水平、鉛直方向から外れて、つねに正しい主応力方向の歪を与えることになる。しかも、直線をつかつて、円をつかつて、手数の点ではかわりない。それで、塑性ポアソン比は、すべて、円の方法で求めた。

圧縮前に撮つた積雪薄片全体の顕微鏡写真 (実際の大きさは 30 cm × 30 cm) に透明紙をあて、薄片の中心を中心として、なるべく大きな円をかく。この円の半径を上では c としたが、簡単のために 1 とし、単位円とよぶ。単位円の円周にそつて、薄片組織の目立つ点 (代表点) を正確にうつしとる。積雪組織には、目印となる点が多数あるので、これは困難なことではない。これを 10~15% 圧縮したのちの薄片の写真に重ねて、圧縮前単位円の周上にのつていた代表点、変形後どこに移動したかを調べて、透明紙に記入する。第 2 図にその例を示す。この図では、単位円として半径のちがふふたつの円がとつてある。はじめ単位円周上にのつていた代表点、変形後は白丸印の点に移動したのである。白丸印は全体としては楕円にそつて分布している。もし薄片の変形が完全に均質ならば、代表点は変形後すべて完全に楕円上にのるはずである。しかし、さきにのべたように、薄片の小部分をみれば、歪は一様ではなく、そのような細かい不均一性が個々の代表点の楕円からの外れとして現われている。それにしても第 2 図は密度 0.49 のかたしまりゆきの薄片 25 (報告 I の図版 III-10 に、薄片 25 の一部分の顕微鏡写真が示されている) のばあいで、代表点はかなりよく歪楕円周上にのつている。かたしまりゆきには弱線もなく、不均一性の度合いが小さいからである。これにくらべ、密度 0.40 の薄片 33



第2図 薄片25(密度0.49)の2つの単位円周上につけていた代表点が、変形後は白丸印の点に移動した。これらの点は、それぞれの単位円に対応する歪積円周上によくのついている。 ϵ_1 ; 圧縮方向の主歪, ϵ_2 ; 圧縮に垂直な方向の主歪。



第3図 薄片33(密度0.40)の単位円と、単位円周上につけていた代表点の圧縮変形後の位置(白丸)。

のばあいの第3図では代表点の歪楕円からの外れがかなり大きい。第3図では、ことに歪楕円の左側で外れがひどいが、図版 I-1 に示した薄片 33 の圧縮前の組織でみると、薄片の中心から左側の部分では空隙部分が多く、粒子間の結合が弱いことがわかる。歪楕円にあらわれた歪の不均一性は、この組織の不均一さに基づくものに相違ない。

第2図、第3図のような歪楕円が定まると、さきに説明したようにして塑性ポアソン比 ν が求められる。第1表第4列に示したのが ν の値でほぼ 0.25~0.35 である。これは小島⁴⁾ が傾斜面につもつた雪の流れから求めた塑性ポアソン比よりは、いく分大きいがほぼ一致している。弾性変形について Landauer³⁾ が求めたポアソン比は 0.16~0.19 であるから、塑性ポアソン比は弾性ポアソン比より大きい。

歪楕円の形がきまると、それからすぐ膨脹率 Δ を求めることができる。膨脹率 Δ は歪楕円の面積と単位円の面積との差を単位円の面積でわつたもので、 $(1+\epsilon_1)(1+\epsilon_2)-1$ にひとしい。第1表の第5列は Δ の値である。 Δ の値はすべて負であるがこれは積雪が全体として圧縮されたことを表わす。

第1表 歪楕円から求めた積雪薄片の
塑性ポアソン比と膨脹率

薄片試料番号	密度	圧縮量	ポアソン比	膨脹率
25	0.49	0.13	0.422	-0.082
28	0.45	0.164	0.246	-0.117
29	0.45	0.199	0.270	-0.187
32	0.40	0.240	(0.546)	-0.164
33	0.40	0.128	0.325	-0.100

IV. 積雪を構成する氷粒子内におこる変化

積雪の薄片の匍匐実験に関する報告 I でのべたように、積雪の薄片を圧縮したら、積雪を構成する氷粒子の位置の変化とともに、氷粒子内に (i) 底面迂り、(ii) 粒界迂り、(iii) 局所破壊 (粒界剝離など)、(iv) 歪粒界移動、(v) 粒子の細胞化などの変化がおこつた。匍匐実験では薄片にあまり大きな応力は与えられなかつたが、今の定速度圧縮の実験では非常に大きな応力を薄片内に生ぜしめる。その結果、定速度圧縮実験では、上にあげた5つの変化に加えて、さらに (vi) 再結晶、(vii) 屈折面の形成 (結晶底面の屈折)、(viii) 粒子の割れ目の形成 (劈開) などが見出された。(i) から (v) までの変化のうち、報告 I で詳しくのべたのは (i) から (iii) までであつた。それで、ここでは (iv) の変化からはじめて (viii) の変化までについて述べることにする。

(1) 歪粒界移動

自然状態の積雪から薄片を切り出して、偏光の下で観察すると、その組織の中に見られる結晶粒界は一般に直線的である。これは、自然状態の積雪が、氷の融点に近い温度に長時間おかれていたため、粒子同士が互に平衡状態に達したことによると考えられる。このような直線状の粒界をもつた積雪の薄片を圧縮すると、粒界の直線が曲線にかわつて、粒界が移動するのがしばしば見られる。図版 I-2, 3 および着色図版 V-a にその例を示した。図版 I-2 の写真に見られる結晶粒 A, B の間のほぼ直線状の境界が、薄片の圧縮によつて写真 I-3 のように屈曲した。結晶粒 A が、結晶粒 B を侵蝕して、粒界を結晶粒 B の方向に向つて移動させたわけである。同様な粒界移動は他の粒子の間にもたくさん見られる。松山⁵⁾ も、多結晶氷の曲げ試験を

行なつた際に、もともと直線状だつた粒界が変形後いちじるしく屈曲することを見出している。木下⁶⁾も、圧縮した積雪柱から切り出した薄片の中に、移動して曲つたと思われる粒界を多数見出した。

結晶粒界をはさんで相接する粒子 A, B に応力が加わつたばあい、どちらの粒子が侵蝕されて粒界を自分の領域内に侵入させるかは、応力、歪の性質と、各粒子の結晶軸の方向によつてきまらるであろう。応力のもとに結晶が歪むと結晶の単位体積あたりの自由エネルギー F は大きくなり、結晶は不安定となる。しかし、この自由エネルギー F の増大は、応力が同じであつても、応力と結晶軸の方向との関係で、その度あいがちがう。したがつて、相接する粒子 A, B の結晶軸が互に平行でなければ、一般に両粒子のあいだに自由エネルギーの差が生じ、自由エネルギーが大きく不安定度の高い粒子の方が侵蝕されることになる。

積雪の薄片の圧縮に際してみられる実際の粒界移動の多くは、図版 I-3 に示したように、塑性変形をおこした粒子間の境界にみられる。塑性変形には、同時に弾性変形も重なつているので、各粒子の圧縮変形による自由エネルギーの増大は、塑性変形による増加分と弾性変形による増加分との和である。金属に塑性変形にともなう変形潜熱の存在することからみても⁷⁾、氷においても塑性変形によつて自由エネルギーが増大しないとは考えられない。しかし、特別なばあいとして、塑性変形が結晶格子の歪を生じないような単純な迂りのみでおこるものとするれば、塑性変形による自由エネルギーの変化はほとんどないとしてよいであろう。単純な迂りによつては、ただ、結晶の各部分が位置をかえるだけだからである。それで、粒界移動に關与した 2 つの氷の結晶粒子の塑性変形が、単純な迂りだけでおこつたと考えられる場合だけに着目すると、両結晶粒子の自由エネルギーの変化としては、弾性変形による増加分だけを考えればよいことになる。

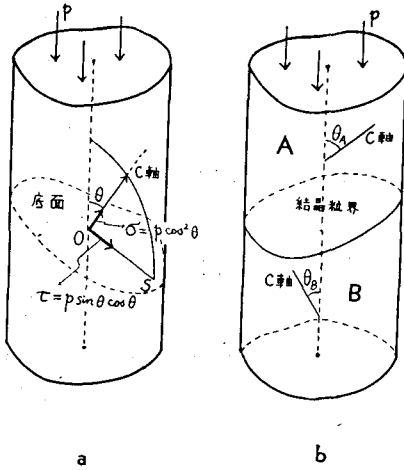
簡単なばあいとして、第 4 図 (a) のように、断面の一樣な氷の単結晶の柱を、圧力 p で柱の軸の方向に圧縮するばあいの自由エネルギーの増加 ΔF を考える。氷の結晶の主軸である c 軸は、柱の軸に対して角 θ だけ傾いているとする。柱の軸方向のヤング率を E とすると、 $\Delta F = p^2/2E$ であるが、 E が結晶の方向によつてかわるので、 ΔF も結晶の方向によつてかわる。氷の結晶は六方晶系に属し、その弾性係数は $S_{11} = S_{22}$, $S_{13} = S_{23}$, S_{33} , $S_{44} = S_{55}$, $S_{66} = 2(S_{11} - S_{12})$ をのぞき、あとは 0 である。このことのため、 E は、 c 軸に直角な a 軸がどの方向をむいているかには無關係に、 θ だけの函数となり、

$$1/E = \varphi(\theta) = S_{11} \sin^4 \theta + S_{33} \cos^4 \theta + (2S_{13} + S_{44}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (1)$$

で表わされる (この式に S_{66} は關係しない)。したがつて

$$\Delta F = \frac{p^2}{2} \varphi(\theta) \quad (2)$$

である。氷の弾性常数は、かなり正確に測定されている⁸⁾。その値を (1) 式, (2) 式に入れて求めた E と θ , ΔF と θ との關係を第 5 図にグラフで示した。 ΔF は、 $\theta = 0$ のところの極小値から



第4図 (a) 結晶主軸(c軸)が、柱の軸と角 θ だけ傾いた単結晶氷の柱を、圧力 p で、柱の軸の方向に圧縮したばあい、底面にそつて生ずる剪断応力 τ と、底面に垂直に働く法線応力 σ を示す。(b)一枚の結晶粒界を境として、A、Bふたつの結晶からなる氷の柱を単純圧縮したばあい。

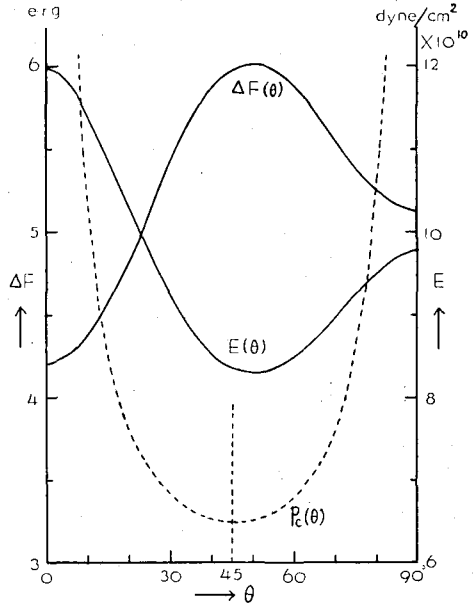
θ が増すとともに増大し、 $\theta \approx 51^\circ$ で極大に達する。その後減少して $\theta = 90^\circ$ のとき第2の極小値をとる。

金属結晶に外力を加えると、すべり面上、きまつたすべり方向の剪断応力が臨界値 τ_c に達しとき、はじめてその方向にすべりがおこる。そして τ_c はすべり面の垂直応力の大小には関係しない。このSchmidtの法則が氷の結晶についてもなりたつことは、まだ証明されていない。ことに、氷の迂り面に垂直応力が作用すると、同じ剪断応力のもとでも、迂り速度が大きくなることが知られているし⁹⁾、また氷では、迂り面内で迂り方向が定まつていない点で金属とはちがう。迂りは、つねに、剪断応力の最大の方向、第4図(a)についていえば、柱の軸と結晶主軸とをふくむ面が迂り面と交わる線OSの方向におこる。しかし、氷でも、臨界剪断応力 τ_c だけは一定であろうと予想してもよいであろう。それで、それを仮定して議論を進めることにする。OSの方向の剪断応力成分 τ は、図にもかいてあるように $p \sin \theta \cos \theta$ にひとしい。 τ が τ_c にひとしくなると迂りがはじまると仮定したので、 p が

$$p_c = \tau_c / \sin \theta \cos \theta \tag{3}$$

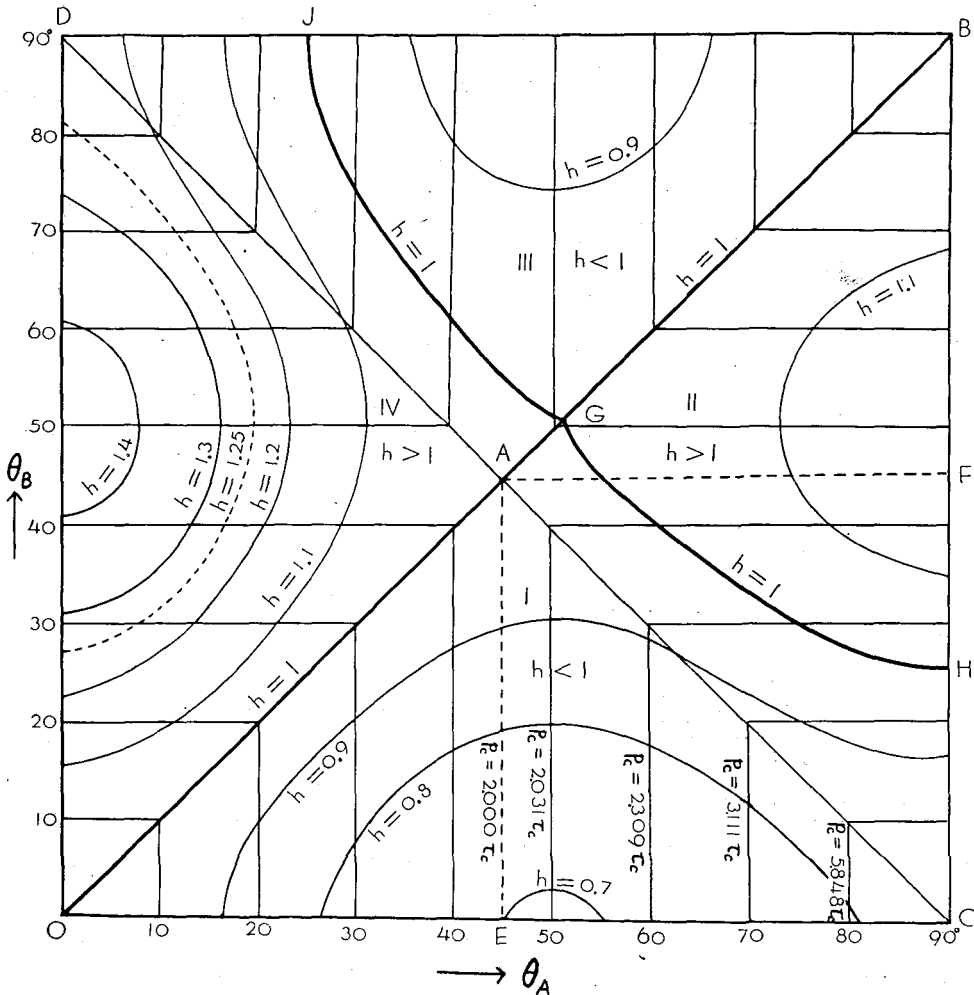
になると、結晶は迂りはじめるわけである。 p_c と θ との関係も、第5図に示してあるが、その関係は $\theta = 45^\circ$ の鉛直線に対して左右対称な曲線で表わされる。

第4図(b)のように、柱が一枚の結晶粒界を境として、A、Bふたつの結晶からなるばあい



第5図 第4図(a)に示したような単結晶氷に 1 kg-wt/cm^2 の力を加えて圧縮したばあい、単位体積当りに増加する自由エネルギー ΔF は、柱の軸とc軸とのなす角 θ によつて、この図の曲線 $\Delta F(\theta)$ のように変化する。曲線 $E(\theta)$ は、柱の軸の方向におけるヤング率を示す。また、単結晶氷が迂りをおこしはじめるとともに氷にかかる圧力 p_c と θ との関係線を破線 $p_c(\theta)$ で示した。

を考えよう。結晶 A, B の c 軸が柱の軸とのなす角をそれぞれ θ_A, θ_B とする。圧力 p をましてゆくとき、 p がどちらかの結晶についての臨界値 p_c に達すると、 p が臨界値に達した方は結晶で迂りがはじまり、 p の増大はそこでとまる。どちらの結晶が先に迂りはじめるかをみるために、第 6 図のように、 θ_A, θ_B を座標として互に直角な方向にとり、結晶 A あるいは結晶 B が先に迂りをおこす範囲を定めてみよう。 $\theta_A > \theta_B$ の関係がなりたつ直線 OAGB の下側にまず注目する。 $\triangle OAE$ のなかでは θ_A, θ_B ともに 45° より小さいが、 θ が 45° より小さければ、第 5 図の p_c の曲線からわかる通り、 θ が大きいほど p_c は小さい。したがって、 $\triangle OAE$ の範囲では、



第 6 図 第 4 図 (b) に示したような氷の柱を圧縮した場合、各結晶粒に生ずる自由エネルギーの増加量の比 $h = \frac{\Delta F_B}{\Delta F_A}$ を、 θ_A, θ_B 座標に表わした。太い実線 $h=1$ の上の点では、両結晶粒に生ずる ΔF はひとしい。 $h=1$ の実線で分割される 4 つの領域のうち、I, III では $h < 1$ であり、他の II, IV では $h > 1$ である。この図によつて、第 4 図 (b) のばあい、結晶粒界がどちらの結晶粒に向つて移動するかがすぐわかる。

結晶 A で p が先に p_c に達し、結晶 A が迂る。△AFB では、 θ_A , θ_B とともに 45° より大きいので、 θ_B の方が先に p_c に達する。したがって、△AFB 内では、結晶 B の方が迂る。△AEC では、 θ_A は 45° より大きく、 θ_B は 45° より小さいが、 θ_A と 45° との差は、 45° と θ_B との差よりも小さい。 p_c の曲線からわかるように、 45° と θ の差が小さいほど、 p_c は小さい。それゆえ、このばあいには結晶 A がすべる。△AFC では、関係が逆になり、結晶 B がすべることになる。結局、鉛直平行線をいれた △OAC のなかでは、結晶 A がすべり、水平平行線をいれた △ACB のなかでは、結晶 B がすべる。平行線のおのおの上では、 p_c は一定で、その値は平行線にかきそえてある。直線 OAGB の上側にある △OAD, △ABD の範囲では、それぞれ、結晶 B, 結晶 A が迂ることも、同様にして知ることができる。

かりに結晶 A がすべるとしよう。すると、結晶 A はもとより、結晶 B もおなじ $p_c(\theta_A)$ の圧力をうけることになり、結晶 A の自由エネルギーの増加は $\Delta F_A = \frac{p_c^2(\theta_A)}{2} \varphi(\theta_A)$, 結晶 B の自由エネルギーの増加は $\Delta F_B = \frac{p_c^2(\theta_B)}{2} \varphi(\theta_B)$ で与えられる。 ΔF_B と ΔF_A の比を h とすると、 h は p_c には無関係な θ_A , θ_B だけの函数

$$h(\theta_A, \theta_B) = \frac{\Delta F_B}{\Delta F_A} = \frac{\varphi(\theta_B)}{\varphi(\theta_A)} \quad (4)$$

となる。結晶 B の方がすべるばあいでも、 $h = \Delta F_B / \Delta F_A$ はやはりおなじ $\varphi(\theta_B) / \varphi(\theta_A)$ で表わされる。それで、結晶 A, B のうちのどちらが侵蝕されるかは、 h が 1 より大きいか小さいかで判断すればよい。 $h < 1$ ならば、 $\Delta F_A > \Delta F_B$ で、結晶 A が、結晶 B によつて侵蝕され、結晶粒界は結晶 A の領域にむかつて移動し、 $h > 1$ なら、逆に結晶 B の方が侵蝕される。第 6 図の曲線は h が一定値をもつ点の軌跡であるが、これからわかるように、OAGHC の領域 I と JGB の領域 III では $h < 1$, 領域 II, IV では $h > 1$ である。それゆえ、 θ_A , θ_B が領域 I, III にあるときは結晶 A が侵蝕され、領域 II, IV では結晶 B が侵蝕をうける。ところで、領域 I と III とは、結晶 A がすべりをおこす領域 △OAC と △DAB とだいたい一致している。領域 II と IV と結晶 B がすべる範囲との関係もまたおなじである。したがって、侵蝕されるのは多くの場合、すべりをおこす結晶の方であるといつてよいであろう。ただ、例外として、 θ_A , θ_B が DACHGJ のせまい部分にあるときだけは、この関係が逆になり、すべつた結晶の方が、すべらない結晶を侵蝕する (h が一定の曲線の θ_A 軸に対する関係は $1/h$ 一定の曲線の θ_B 軸に対する関係と同一である。たとえば、 $h = 0.8$ の曲線と $h = 1.25 = 1/0.8$ の曲線とは、対角線 OAB に関して対称の関係にある)。

圧縮される積雪の薄片にみられる粒界移動は、もとより、うえにのべたような単純な条件のもとにおこるものではない。氷の粒はその長さの方向の圧縮力以外に、それに直角な方向の剪断力、また曲げの力もうけるであろう。しかし、だいたいにおいて圧縮力の影響が強いと考えてよいであろう。それで、うえの簡単なばあいについて得られた 'すべりをおこす粒子の方が侵蝕されやすい' という結果に照して、図版 I-2, 3 の写真の粒界移動を見ると、'すべり線が強くでている粒子の方が、すべり線の弱い粒子によつて侵蝕される' ということができる。結

晶粒 B と C との境界は C の方に向つて移動しているが、結晶粒 C の方がたしかに迂り線が強く現われている。結晶粒 B と D との粒界も、迂り線の強い D の方に移動している。これらの図版 I-2, 3 にあげた例以外のばあいについてみても、実際に、すべり線の強くでている粒子の侵蝕されるばあいの方が、逆のばあいに比べてはるかに多いのである。

上の簡単なばあいについての理論では、一方の粒子はすべりをおこすが、他方の粒子はすべりをおこさなかつた。しかし、図版 I-3 の結晶粒 B と C とでは、C を侵蝕した B にもすべり線がみえる。その他のばあいでも、両方の粒子がすべつていのがほとんどである。これは、さきにのべたように、圧縮力以外に剪断力や曲げの力がはたらき、侵蝕する方の粒子にも迂りがおこるとして説明されよう。粒子の形も一樣な柱ではなく、しかも圧縮力以外に剪断力や曲げの力が働けば、応力は一樣ではなくなり、結晶粒界上、場所がちがえば応力もかわる。その結果、だいたいの傾向は上の理論の結果と一致するとしても、粒界の各点の移動速度に差異が生ずるのは当然である。事実、ほとんどの粒界の移動距離は粒子の中心部で大きく、周辺部では小さい。

(2) 粒子の細胞化

強い圧縮をうけた積雪の薄片、とくにかたしまり雪の薄片では、もとは 1 つの単結晶だった粒子が多数の小さな結晶粒に分れているのが観察される。図版 II-4, 5, 6 のそれぞれの粒子 A, 着色写真の図版 V-b の中央の粒子がその例である。偏光顕微鏡で注意深く観察すると、図版 V-b の粒子に見られるように、これらの小さな結晶粒の結晶主軸方向は、はじめの結晶の主軸方向とかわつていないことがわかる。もつとも、わずかに方向をかえたものも観察されることがあるので、一般には、この観察法では認めえない程度の極めて小さな方向変化をおこしているであろう。このような結晶粒子の下部組織が形成されることは、金属結晶においても観察され、細胞化あるいはサブグレインの形成とよばれている。また金属のばあい、あい接する結晶粒のあいだの傾きは 1° 以下なので、結晶粒の境界を小角度粒界という。細胞化の結果生じた氷の結晶のサブグレインの大きさは一定ではないが、 $20\sim 80\mu$ の範囲内にあることが多く、金属結晶におけるサブグレインの大きさ(数 μ 程度)よりかなり大きい。

サブグレインは、外観的な形でもまた種々様々である。図版 V-b の粒子に見られる細胞化が最もよく見られるもので、個々のサブグレインは多角形に近い形をもっている。次によく見られるのは図版 II-4 の粒子 A のように、ある点を中心としてほぼ放射状にのびた線によつて分割されるばあいである。この種の形式は、第 4 項で述べる屈折面の形成と密接な関係があるものと思われる。第 3 に、ほぼ平行な線で囲まれた細長い形のサブグレインもよく見られる。図版 II-5 の粒子 A に生じた細胞化がこの例である。この種のもは双晶であるかも知れない。最後に、結晶粒子全体にわたつて、上にあげた 3 種類のサブグレインあるいはその中間形が混在している図版 II-6 の粒子 A のようなものがある。この場合、周囲の粒子にほとんど何の変化も生じていないのに、粉子 A だけがひどく変化したのは極めて対照的である。

前報告 I でのべたように、積雪粒子におこる一般的変化は底面迂りと粒界迂りとである。

ところが、 $\bar{1}$ り面である結晶底面にそつて大きな剪断応力が働いても、その底面の端が隣接する粒子にぶつかっている場合、すなわち隣接粒子との粒界でおわつている場合には、隣接粒子の妨害が大きいために底面で自由 $\bar{1}$ ることができない。このようならばあいには、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ずれた状態となる。この状態はエネルギー的に不安定なので、粒子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。この過程が粒子の細胞化である。したがつて、細胞化は一般に結晶粒界あるいは粒界に近い部分からはじまる。図版 II-4, 5, およびのちのべる図版 IV-15 の粒子 A の、白い矢で印した部分 b におこつた細胞化はこのよい例である。

(3) 再 結 晶

図版 II-7 の粒子 A, B の粒界附近に見られる小さな結晶粒は、前の細胞化と見かけ上よく似ているので、細胞化と間違いやすいが、偏光顕微鏡の下で調べると、これらの小さな結晶粒の主軸方向は、はじめの結晶の主軸方向と全く異なつてることがわかる。図版 I-3 の粒子 B の下部に生じた小さな結晶粒も図版 V-a に着色写真で示したように、はじめの結晶の色と異なつている。これは、この場所で再結晶がおこつたことを示している。図版 V-d の左側の、 $\bar{1}$ り線を生じた黄色い粒子の右下隅に見られる紫色の小さい結晶粒、および、同じ粒子の左上方面に見られる濃い桃色の結晶粒は、いずれも粒子がそこで再結晶をおこしたことを示している。

再結晶は、細胞化あるいは底面 $\bar{1}$ りおこした粒子の粒界またはその近傍において多く発生する。細胞化の項でものべたように、氷の粒子が $\bar{1}$ りをおこして塑性変形するばあいには、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はずれた状態となる。この状態はエネルギー的に不安定なので、粒子内に新たな核が発生し、それが成長して大きくなり、より安定な状態をとらうとするのである。Steinemann⁹⁾ は、 $\bar{1}$ りがおこつても、 $\bar{1}$ り面が彎曲しなければ再結晶はおこらないが、曲るとおこるといつている。

再結晶も、底面 $\bar{1}$ り、細胞化などの他の現象と同様に、薄片の圧縮中にもおこるのであつて、それについては、あらためて、後の第 VI 節第 2 項でのべる。

(4) 屈折面の形成 (結晶底面の屈折)

底面 $\bar{1}$ りをおこした粒子の $\bar{1}$ り線にほぼ垂直な方向に 1 本乃至数本の真直ぐな線が見られることが多い。この線を境として、 $\bar{1}$ り線が僅かではあるが (角度にして数度内至十度)、急に折れ曲つている。図版 II-8 に矢で示した線がこの例である。着色写真の図版 V-c の中央上方の粒子に左上から右下に走る明瞭な線もこの例で、それを境として $\bar{1}$ り線が急激に折れ曲つている。 $\bar{1}$ り線の折れ曲りから、この線の両側では、結晶主軸方向が数度内至十度位ちがつてることが予想される。実際、偏光顕微鏡で主軸方向を調べたら、たしかに、 $\bar{1}$ り線の食い違いに等しい角度だけ食い違つていた。 $\bar{1}$ り線に垂直に発生した、このような結晶方位の不連続面は屈折面 (bend plane) とよばれ、挫屈面 (kink plane) の 1 種である。屈折面の形成は、六方晶系に属する結晶体に特有な現象であつて、氷以外の結晶では高温度でゆつくり引張り、圧縮あるいは曲げ変形させた場合に生ずることが知られている。雪の薄片は $-8^{\circ}\sim-12^{\circ}\text{C}$ で圧縮

したのであるから、雪の薄片としては融解点に近い高温にあつたわけである。

転位理論によると、屈折面は同符号の刃状転位が多角形化した結果1線上に集つてできた刃状転位の壁であるといわれている。氷に転位が存在することを直接実証した研究は今のところないが、他の結晶体におけると同様、氷にも転位はあると考えてよいであろう。若浜¹⁰⁾は、ふつうの多結晶氷をゆつくり圧縮変形させた場合に、屈折面が形成される過程を観察し、転位論でその説明を試みた。屈折面形成の初期の段階では底面が次第に弯曲するのが見られる。これは歪硬化の1つの原因と考えられる。しかし、弯曲した底面上の転位が多角形化をおこし、刃状転位が一直線上に並んで屈折面を形成すると、氷は軟化してはじめに近い状態にもどる。

(5) 粒子の劈開

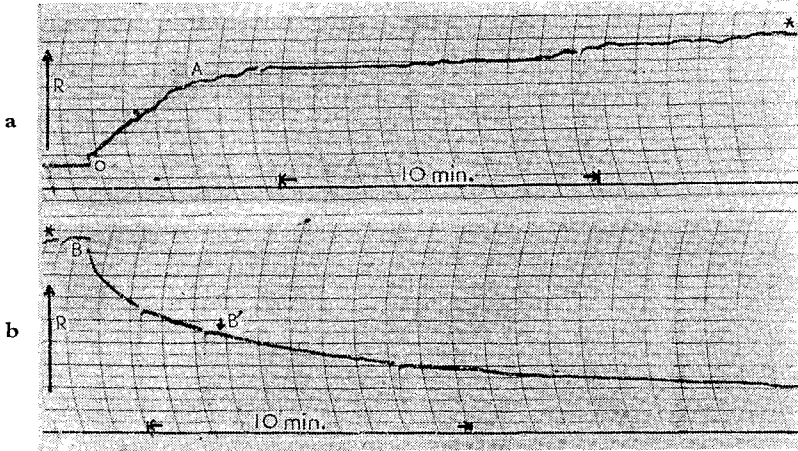
力をうけた積雪組織のうち、大きな変化をおこした部分には、図版 II-9 の粒子 A, B に矢を印したような割れ目が見られる。これは粒子の部分的な破壊、すなわち局所破壊の一種である。図版 II-7 の2つの割れ目はいずれも底面にそつた割れ目で、劈開と考えることができる。この割れ目の底からは屈折面がはじまつている。割れ目の面を境にして、その面の一方の側にある結晶部分だけが挫屈したわけである。

以上、積雪薄片を圧縮した際に、その組織に見られた変化のうち、歪粒界移動、粒子の細胞化、再結晶、屈折面の形式、粒子の劈開についてのべた。積雪の変形の重要な因子である底面迂り、粒界迂り、内部破壊については報告 I にのべたので、ここではふれなかつたが、図版 I~V にかかげた写真を見ると、これらの変化が積雪の変形にいかにか大きな役割を果しているかがよくわかる。とくに底面迂りはほとんどの写真に見られ、図版 I-3 の粒子 B, II-5 の粒子 B, IV-12~16 の粒子 A などは、その顕著な例である。

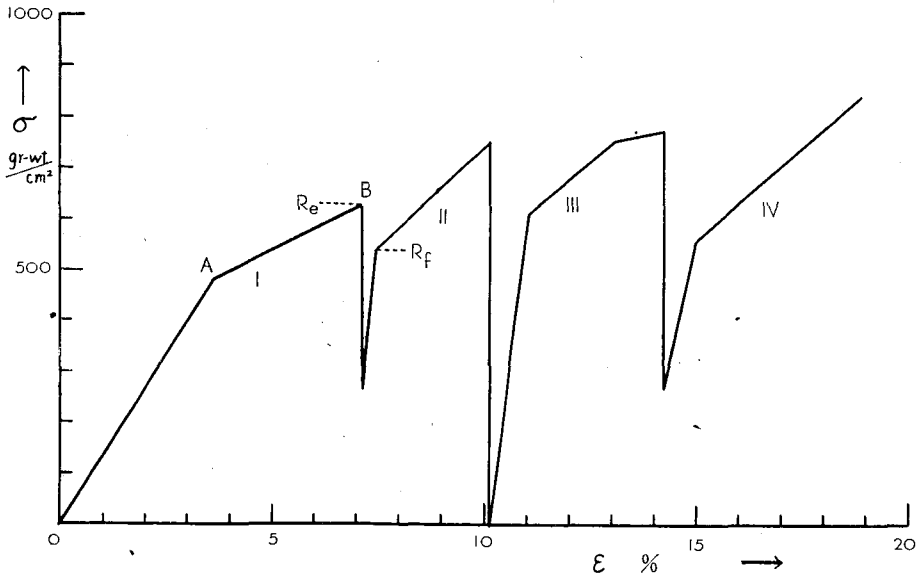
V. 積雪の圧縮に対する反抗力

第1図の装置によつて、薄片を薄片の面の方向に圧縮したときに、薄片が示す反抗力の時間に対する変化の1例を第7図(a)に示した。圧縮板が薄片の側面にO点で接触すると同時に、積雪は反抗力を現しはじめ、その値は0から急激に直線的に増大する。圧縮は一定速度で行なわれているので、この図の時間軸は薄片の歪に比例する量を表わしていると考えてもよい。反抗力が図のA点の値に達すると、それ以後は反抗力の増し方が緩慢になる。A点はこの試料の弾性限界すなわち降伏点である。木下²⁾の雪の柱の圧縮実験によると降伏点における反抗力の値、すなわち降伏応力は雪の密度、雪質、圧縮速度、温度などによつて広範囲に亘つて変化する。この薄片圧縮の実験では、雪の密度、圧縮速度、温度などを自由にかえることできなかつたが -10°C で密度0.4程度のしまり雪を6~7%/hrの速度で圧縮した場合の降伏応力は300~400 gr-wt/cm²、密度0.45のかたしまり雪を同じ速度で圧縮したときの降伏応力は500 gr-wt/cm²であつた。降伏点に達したときの歪は1~2%のことが多く、また、降伏するまでに要する時間は5~10分であつた。

降伏点を過ぎて塑性変形に入ってから、試料の示す反抗力の増加率は弾性変形における反抗力の増加率の $1/5 \sim 1/10$ にさがるが、たしかに増加しつづける。すなわち、歪硬化の現象を示す。しかし、さらに圧縮がつづく、反抗力の増加率は減少し、ついに歪が増加しても反抗力はほとんど増加しない横ばい状態になる。ところが、それにつづいて、再び反抗力の増加がはじまる。そして、やがて、組織に巨視的な破壊がおこる。今回の実験の目的は主として積



第 7 図 積雪薄片の示す反抗力曲線。(a) O で圧縮をはじめてから A に達するまで反抗力が急激に増大し、A をすぎると反抗力の増し方が緩慢になる。(b) は (a) のつづきであるが、圧縮の途中の B 点で、圧縮を急に止めてからの反抗力の減少を示す。



第 8 図 薄片 29 の初圧縮から、第 3 次再圧縮までの歪-応力曲線図。
I が初圧縮で、II 以後が再圧縮の曲線である。

雪の塑性変形の研究にあつたので、多くの場合は破壊する前に圧縮を中止した。第7図(b)は同図(a)のつづきであるが、塑性変形の途中のB点で圧縮を急に止めると、反抗力は急速に減少し、応力緩和の現象が現われる。反抗力が負荷の中止直前の値Bの1/2(図のB'点)に減少するまでに要する時間は5~15分である。

以上のような積雪薄片にみられる反抗力の変化および応力緩和の現象は、木下²⁾が積雪柱の圧縮について得た結果とほとんど一致する。したがって薄片という特殊な形の資料にしても、積雪はその本来の弾性、塑性を変更しないとみてよい。

圧縮を止めて、応力が緩和した試料を再び圧縮すると(このときの圧縮を前の初圧縮に対して再圧縮という。再圧縮を2回以上行なつたときは、第1次再圧縮、第2次再圧縮などとよぶことにする)、反抗力は初圧縮のときの数倍の速度で増加する。すなわち、圧縮することによつて外力に対する積雪の弾性抵抗—ヤング率—が増大したことを示す。第8図にその例を示した。この図は薄片29(密度0.45)の初圧縮から、第3次再圧縮までの歪—応力曲線図である。この場合、初圧縮の際のヤング率 1.2×10^7 dyne/cm² が、第1次再圧縮ではその7倍に当たる 8.4×10^7 dyne/cm² に増加した。また、薄片33(密度0.40)の場合は、初圧縮のヤング率が 4.4×10^7 dyne/cm² で、第1次再圧縮ではその約3倍に当たる 12.1×10^7 dyne/cm² になつた。このように、加工とともに積雪のヤング率が増加する現象は、すでに吉田¹⁾、木下²⁾ からも見ているところである。ヤング率が増加するとともに、再圧縮した場合の降伏応力も、初圧縮の際の降伏応力より増大する。しかし、再圧縮したときの降伏応力 R_f は、第8図に示したように初圧縮のときに達した最大応力 R_e にまで達することは決してない。通常 R_f が R_e の80~95%に達したときすでに降伏してまう。これは初圧縮終了後、再圧縮を始めるまでのあいだに積雪が軟化したことを示している。すなわち、積雪は加工によつて硬化をおこすと同時に、また軟化もおこしていることがわかる。再圧縮を何度か行なうと、その度に降伏応力は増加する。しかし、ヤング率は第1次再圧縮のときの値と同じか、あるいはその度に僅かながら減少する。歪が大きくなつて組織の一部に破壊がおこると、ヤング率も降伏応力も減少する。たとえば第8図にIVと印した第3次再圧縮の場合は、第2次再圧縮の際のヤング率 6.3×10^7 dyne/cm² から 3.7×10^7 dyne/cm² に減少し、また、降伏応力は 608 gr-wt/cm² から 550 gr-wt/cm² に減少した。これは、第2次再圧縮の間に、この薄片(薄片29)の1つの対角線にそつて剪断破壊が生じたためである。

VI. 積雪の変形にともなう積雪組織の変化の過程

前節でのべたように、積雪を圧縮すると、ヤング率も降伏応力も増大する。すなわち、積雪は加工することによつて弾性的にも塑性的にも強くなるのである。一方、再圧縮するときには、それ以前にうけた最大応力よりも小さな応力で降伏する。これは積雪が硬化と同時に軟化していることを示している。

このようなヤング率の増加、歪硬化および軟化は、小島¹²⁾、木下²⁾が積雪柱を圧縮した場合にも常に認められたことで、積雪に著しい現象である。これらの現象に、積雪を構成する氷

粒子におこる底面入り、粒界入り、局所破壊、粒界移動、粒子の細胞化、屈折面形成などの変化が何らかの形で関係をもっていることは疑いない。

第 IV 節では、大きな塑性変形をうけてしまった積雪薄片の氷粒子にみられるいろいろな変化についてのべた。この節では、前節にのべたような、反抗力を示しつつ薄片が圧縮されてゆく途中で氷粒子の変位、変形の経過をたどるとともに、積雪の硬化、軟化の原因をこれら氷粒子の変位変形過程のうちに探してみることにする。

(1) 積雪の弾性変形と積雪組織の変化

前報告 I でのべたように、積雪は強い部分（基本領域）が弱い部分（弱線）によつて囲まれた団粒構造でできている。したがつて、積雪を連続体と仮定したばあいの応力は一様であるとしても、実際の積雪組織をつくつている氷の各粒子に加わる力は均一ではない。粒子間の結合が悪い弱線部分の粒子に加わる力は、基本領域の粒子に加わる力よりも一般に大きい。その結果、基本領域におこる弾性歪にくらべて弱線部分に生ずる弾性歪がはるかに大きくなり、組織全体としての弾性歪は弱線部分の歪によつて定められる。

応力が増大すると、弱線に沿つて存在する氷粒子が降伏点に達し、塑性変形をはじめ。このときが初圧縮における降伏点である。更に圧縮をつづけて応力を増大させると、やがて、弱線の両側にある氷粒子は次第に接触するようになり、ついには基本領域が直接あい接して、弱線は消滅する。再圧縮においては、弱線は存在しないので、組織全体の弾性歪は基本領域の弾性歪とひとしくなり、初圧縮における組織全体の弾性歪よりは小さい。その結果、再圧縮でのヤング率は初圧縮のヤング率より大きな値となる。

初圧縮で、弱線がつぶされて消滅することは積雪薄片の圧縮実験で現実に見ることができ。図版 III-10 の写真は弱線附近の組織の一部である。これが、左右から 13% 圧縮された結果写真 11 のようにかわつた。写真 10 で、A, B, C……などの記号をつけた氷粒子の列にそつて弱線が破線で示してある。写真 11 にみられるように、圧縮の結果、圧縮前にははなれていた粒子 A と C, 粒子 B, D, E, 粒子 F と G, 粒子 E, L, M などが接触し、弱線にそつて存在していた広い隙間は失なわれて、弱線はほとんど消えてしまった。また、氷粒子自体には、底面すべりを表わす入り線、結晶粒界の移動、局所破壊などの現象が見られる。再圧縮は、この写真 11 のような状態を出発点として行なわれるわけである。

(2) 積雪の塑性変形と積雪組織の変化

降伏点をすぎたなお圧縮がつづき、薄片が塑性変形をうけつつその組織をかえてゆく有様を、図版 IV の 5 枚の写真 (12~16) に示した。写真 12 は圧縮前の薄片 (薄片 33) の一部である。結晶粒界は直線で、氷の粒子自身に内部構造はみられない。圧縮がはじまつても、薄片の示す反抗力が降伏応力に達するまでは、底面入りなどの氷自体の変化はみとめられない。入りなどの変化がはじめて見られたのは、降伏点をこえて塑性変形にうつてからである。圧縮にともなう反抗力の増大速度が減少したあと、すなわち降伏点をすこしすぎて歪 $\epsilon=0.02$, 反抗力 $R=400 \text{ gr-wt/cm}^2$ に達したとき、写真 13 に示すように、粒子 A には大きな入りを伴う

底面 \rightarrow り線が現われ、粒子 A は上下 a, b ふたつの部分にわかれた。写真 14 は $\epsilon=0.03$, $R=435 \text{ gr-wt/cm}^2$ になつたときの状態である。粒子 A の \rightarrow り線が発達するとともに、その \rightarrow り線の下にある部分 b で再結晶がはじまつた。さらに圧縮がすすみ $\epsilon=0.07$, $R=640 \text{ gr-wt/cm}^2$ になつたときの写真 15 では、粒子 A の b 部分の再結晶が益々顕著となると同時に、粒子 A の上の部分 a には全体にわたつて \rightarrow り線が現われた。また、粒子 B と C を連結していた粒界は \rightarrow つて破断した。粒子 B では、さらにその左端に矢印で示した粒界で粒界移動をおこしている。粒子 D も底面 \rightarrow りをおこし、もともと直線状だつた粒子 A と D の粒界は乱れを現わしている。さらに $\epsilon=0.123$, $R=1000 \text{ gr-wt/cm}^2$ に達したときの状態が写真 16 である。粒子 B と C は完全に分離して、C は B の下側に入り込んでしまつた。また、粒子 D は粒子 A によつて侵蝕され、AD 間の粒界は粒子 D の領域内に移動している。粒子 A の \rightarrow り線のところでの食い違いは更に大きくなり、 \rightarrow り線の下側の部分 b に生じた再結晶粒は、その 1 つ 1 つが成長して大きな結晶粒になつた。歪が 10% をこえ、薄片にかかる力が $800\sim 900 \text{ gr-wt/cm}^2$ に達すると、組織のいたるところで、以上のべたような底面 \rightarrow り、粒界 \rightarrow り、粒界移動、局所破壊、細胞化、再結晶などがおこつた。

上の例では、はじめに氷粒子に現われる変化は底面すべりであつたが、観察した他の例でも、やはり、まず底面すべりが現われた。そして、塑性変形が進むにつれて粒界すべり、細胞化、破断などがおこる点でも、この例とおなじである。結局、氷の粒子の破断がおこることのぞけば、金属その他の物質におこる塑性変形と積雪の氷の粒子におこる塑性変形とのあいだには大きな差異はない。

前節 V でのおべたように初圧縮を中止した瞬間の反抗力 R_0 より、再圧縮での降伏反抗力 R_f が小さいということも、おなじことを亜鉛、アンチモンなどで見ることができる。このような融点の低い金属は、室温で引張つて、歪が一定値に達するごとに除荷して応力を除き、1 分間くらいおいてから再び荷重を加えると、積雪の場合と同様に、それ以前に加えられた最大応力よりも小さい応力で降伏することが知られている。

積雪薄片圧縮は 0°C 以下数度のところで行なわれ、氷粒子はその融解点ちかくにある。多くの物質では R_f が R_0 に一致するにもかかわらず、積雪やここにあげた金属で R_f が R_0 より小さいのは、おそらく、温度が融点に近いということにあるのであろう。しかし、塑性変形の増大とともに一般的には反抗力がまし、硬化がおこることは多くの物質と同様に、積雪でもみられることである。この硬化の原因の主なもの、他の物質におけると同様、底面すべりの進行にともなう結晶格子のゆがみ、底面すべりがとなりの結晶粒に妨害されたために、その結晶格子に生ずる歪みである。たとえば、図版 IV-17 の粒子 A のすべり線は曲つていて、結晶格子がゆがんだことを示している。この氷粒子自体の硬化に加えて、積雪では離れていた氷粒子が変形とともに接触するという、積雪の組織の特異性からくる要素が加わる。一方、氷粒子自体における屈折面の出現、粒子の細胞化、再結晶などは、結晶格子のゆがみがある限度に達して現われるもので、その結果として格子のゆがみは除かれ氷の粒子は軟化して正常な状態にもどる。

つまり、一般に硬化現象には同時にそれを緩和する軟化現象が伴うものであるが、積雪のばあいには、これらのほかにさらに氷粒子の破断という軟化作用がある。積雪が空隙の多い、氷の粒子の立体的網状結合という組織であるために生ずることで、その網の一部が破断すれば積雪の組織が弱くなることはいうまでもない所である。この破断は図版 IV-12~16 の粒子 B-C 間に見られるように、かなり頻繁におこるのであつて、積雪の軟化現象の要素としては重要なものと考えられる。

VII. 要 約

アニリン法により、厚さ 0.6~0.7 mm の積雪(しまり雪、かたしまり雪)の薄片を作り、 $-8^{\circ}\sim-12^{\circ}\text{C}$ の低温実験室内で、薄片の面にそう方向に一定速度で圧縮した。薄片の氷粒子の間隙には液体アニリンがつまっている。薄片に加えた歪速度は 4%/hr~8%/hr である。薄片の各点の変位、薄片の示す反抗力を求め、それから積雪のポアッソン比、膨脹率、歪一応力曲線などを導いて、変形および反抗力と組織に生じた微細な変化との関係を調べた。得られた結果をまとめると次のようなことがいえる。

(1) 積雪内部におこる歪は、報告 I でのべたように均一ではない。しかし変形量が 15% 以下の場合、薄片全体にわたる広い領域について薄片各点の動きから歪楕円を描いて調べてみると、比較的一様に変形していることがわかつた。このことを利用して歪楕円から密度が 0.4~0.5 の積雪の塑性ポアッソン比を求めた結果、0.25~0.35 の間の値を得た。

(2) 歪一応力曲線から降伏点が定められる。密度 0.4, 0.45 のしまり雪を 6~7%/hr の速度で圧縮した場合の降伏応力はそれぞれ 300~400 gr-wt/cm², 500 gr-wt/cm² であつた。

(3) 積雪を圧縮すると、歪の増大とともに積雪が示す反抗力も増加する。この硬化の過程において積雪組織に生ずる微細な変化を観察した結果、積雪の硬化の原因として、粒子の結晶格子の歪み、粒子の多結晶化、粒子の接触による結合などがあることがわかつた。

(4) 積雪を再圧縮すると、初圧縮のときよりも大きなヤング率を示す。はじめ組織の中にある弱線が初圧縮のためにつぶされて消失したためである。

(5) 再圧縮のばあいの降伏応力は初圧縮のときの降伏応力より大きい、初圧縮のとき加えた最大応力の値よりは小さい。すなわち、初圧縮と再圧縮とのあいだの圧縮中断中に積雪はあるていど軟化する。積雪組織に生じた変化のうち、軟化の原因と考えられるのは、組織の局所破壊、粒子の劈開、粒界移動、再結晶、屈折面の形成、サブグレインの形成などである。

おわりに、終始御指導を賜つた吉田順五教授に厚く御礼を申し上げます。また、助言と援助を惜しまれなかつた藤岡敏夫助教授、木下誠一講師に感謝の意を表します。なお、この研究の費用の一部は、文部省科学研究費から支出された。

文 献

- 1) 若浜五郎 1960 積雪の薄片を応用した積雪の組織および内部歪の研究 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 37.
- 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.

- 3) Landauer, J. K. 1957 On the deformation of excavations in the Greenland névé. SIPRE Report, **30**, 1.
- 4) 小島賢治 1960 斜面積雪の粘性流動 I. 低温科学, 物理篇, **19**, 147.
- 5) Matsuyama, M. 1920 On some physical properties of ice. Jour. Geol., **28**, 607.
- 6) 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, Hokkaido Univ., No. **15**, 35.
- 7) Suzuki, T. 1949 The release of energy associated with crystal restoration process in cold-worked polycrystalline copper. Sci. Rep. Res. Inst., Tohoku Univ., **1**, 193.
- 8) Stephens, R. W. B. 1958 The mechanical properties of ice II. The elastic constants and mechanical relaxation of single crystal ice. Advances in Physics, **7**, 266.
- 9) Steinemann, S. 1958 Experimentelle Untersuchungen zur Plastizität von Eis. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Hydrologie, Nr. **10**.
- 10) 若浜五郎 (未発表).
- 11) Yosida, Z. and Colleagues 1956 Physical studies on deposited snow. II. Mechanical properties. (1). Contributions from the Institute of Low Temperature Science, Hokkaido Univ. No. **9**.
- 12) 小島賢治 1955 積雪の粘弾性に関する実験. 雪氷, **16**, 34.

Résumé

In the previous experiments (Paper I), thin sections of snow were compressed by constant static loads. By observing under a microscope the displacements of ice grains composing the snow, it was found that the thin section was divided into many strong domains which the author named 'basic domains'. They were of the order of cm in linear dimension. Along the contact lines between any two adjacent basic domains the texture of snow was weak; the author called those lines 'weak lines'.

In the present experiments the thin sections of snow were compressed at a slow constant speed (0.02 mm/min) instead of by constant loads. Use was made of a small compressing apparatus shown schematically in Fig. 1. The section of snow indicated by D, being placed just below the objective lens of a polarising microscope, was pushed towards the right by a piece of metal P which was advanced by a synchronous motor M through two reduction gears J₁ and J₂. Together with the observation through the microscope of the changes occurring in the texture of the thin section, the resistance R of the thin section to the compression was electrically recorded by recorder U through transducer T of strain gauge type. The experiments were made in a cold room at -8° ~ -12°C.

Fig. 7 shows an example of R-curve; the upper curve (a) is continued as the lower one (b). At the beginning the resistance R rises rapidly to point A due to nearly elastic compression. After that, R comes to increase slowly, which indicated the plastic compression accompanied by the phenomenon of hardening. As soon as the compression is stopped at point B, R begins to relax. While the section is undergoing the elastic compression, no marked changes other than displacements of the ice grains can be detected under the microscope. But soon after the yield point A, there begin to appear on the

ice grains many slip lines parallel to the crystallographic basal plane of the grains. As the compression is advanced further, many other kinds of deformation make appearance such as slips at grain boundary, separation of grains, migration of grain boundary (Photos. 2-3, Pl. I), formation of cells in grains (Photos. 4-6, Pl. II, Photo. b, Pl. V), recrystallization (Photo. 7, Pl. II), formation of bend plane (Photo. 8, Pl. II), cleavage fracture of grain (Photo. 9, Pl. II) and inhomogeneous lattice bending (Photo. 17, Pl. IV). The series of photographs 12-16, Pl. IV illustrates the process of change occurring in the same portion of a thin section of snow. Photo. 12 is before the compression while Photos. 13-16 are respectively at the contractions of 2%, 3%, 7% and 13%. Slip lines are seen in grain A of Photo. 13 which develop further in the succeeding photographs. The formation of cells is seen in the bottom portion of grain A, Photos. 14, 15; an internal fracture at the boundary between grains A and C, Photo. 15; new basal slips in grains A and D in Photo. 15; migration of the grain boundary between grains A and D, Photo. 16; recrystallization in the bottom portion b of the grain A, Photo. 16.

As for the migration of grain boundaries, it was found that in most cases the boundary was shifted in the direction from the grain of less marked slip lines to the one provided with stronger slip lines. A theory was developed to account for that direction of migration. Let a pillar of single ice crystal with its c -axis inclined at an angle θ to the axis of the pillar be supposed (Fig. 4). When the pillar is compressed axially by a pressure p , the free energy of ice is increased by $\Delta F = p^2/2E$, where E denotes the Young's modulus of the ice in the direction of the long axis of the pillar. E is a function of θ ; let its reciprocal $1/E$ be represented by function $\varphi(\theta)$. In case the pillar is composed of two ice crystals A and B with their c -axis inclined by θ_A and θ_B respectively, the ratio $h = \Delta F_B/\Delta F_A = \varphi(\theta_B)/\varphi(\theta_A)$ determines the direction of migration of their boundary. When $h < 1$, $\Delta F_B < \Delta F_A$, which implies that crystal A is less stable than crystal B. Then crystal B will assimilate crystal A by shifting the boundary between them into the latter. When $h > 1$, the shift of the boundary occurs in the reverse direction. The values of h are mapped by curved lines in the $\theta_A\theta_B$ -plane of Fig. 6. Now let it be assumed that any ice crystal begins to slip on its basal planes when the maximum shear stress on those planes attains a critical value τ_c . Then the critical value p_c of pressure p needed for causing the slip is given by $p_c = \tau_c/\sin\theta \cos\theta$. When the composite pillar is compressed, whichever one of the two crystals A and B which has the smaller p_c slips while the other of the larger p_c remains unslipped. In Fig. 6 the two triangular domains with vertical straight lines are those where crystal A slips, while crystal B slips in the remaining domains with horizontal straight lines. The domains with vertical lines almost overlap those within which $h < 1$. This means that the boundary is shifted towards crystal A when crystal A slips. In the same way it can be seen that crystal B is invaded by crystal A when crystal B slips. Namely, the crystal towards which the boundary is shifted is in most cases that one which slips earlier. And the crystal which slips earlier will, at the end, be traversed by slip lines more marked than those in the other. In the actual case of the thin section of snow the circumstances are not so simple as the case of this theory. But the author believes that the theory is still available for

determining in which direction the boundary should be shifted.

The phenomena such as internal fracture, and migration of grain boundary are the ones which make the texture of snow softer. Therefore, the thin section, although it is caused to become harder and harder by the compression as indicated by the slowly rising portion AB of the curve in Fig. 7, is undergoing a latent softening due to those phenomena. That the softening process is actually going on can be seen by interrupting the compression and then resuming it again. Curves I, II, III, IV in Fig. 8 show the R -curve when the compression is interrupted three times. The value R_e of the resistance at the moment of interruption is always higher than the yield value R_f for the resumed compression, which fact indicates that the softening process is working also during the time of interruption.

Fig. 8 shows also that the elastic rise of R (the steep rise in the first stage of the compression) is much steeper for the resumed compressions than for the first compression. The first compression breaks down the ice grains located near the weak lines causing the basic domains to come into direct contact with one another. This makes the texture of snow strong with the result that the elastic rise at the resumed compression becomes steep. In Photo. 10, Pl. III the dotted line is a portion of a weak line; the ice grains marked A, B, C, are arranged near the weak line. When compressed, as shown by Photo 11, the majority of those marked grains are deformed and displaced so as to fill the large spaces which separated them before.

Poisson's ratio of snow for plastic compression was determined from the deformation occurring to a circle drawn on the thin section (Fig. 2, 3). Its value was found to be 0.25-0.35 in agreement with the results obtained by Dr. Kojima¹⁾ from the flow of natural snow layer deposited on a slope.

図 版 説 明

図 版 I

- 1 薄片 33 (密度 0.40, 厚さ 0.65 mm) の圧縮前の組織。薄片の中心から左側の部分では空隙部分が多く、粒子間の結合が弱いことがわかる。
- 2, 3 圧縮をうけた積雪の粒子に生じた歪粒界移動の例。2に見られる結晶粒 A, B の間のほぼ直線状の境界が、薄片の圧縮によつて3のように屈曲した。同様な粒界移動は他の粒子の間にもたくさん見られる。

図 版 II

- 4, 5, 6 積雪粒子の細胞化の例。4は、粒子 A のように、ある点を中心として、ほぼ放射状にのびた線によつて分割される場合の例である。5の粒子 A に生じた細胞化は、ほぼ平行な線で囲まれた細長い形のサブグレインの例である。なお、粒子 B は、底面迂りによる粒子の変形の顕著な例である。6の粒子 A では、粒子全体にわたつて、いろいろな形のサブグレインが混在している。
- 7 積雪粒子に生じた再結晶の例。粒子 A, B の粒界附近に見られる小さな結晶粒の結晶主軸方向ははじめの結晶の主軸方向と全く異なつていた。これは、この場所で再結晶がおこつたことを示している。
- 8 積雪粒子に生じた屈折面の例。写真の中央の粒子に矢印で示した真直ぐな線を境として、迂り線が僅かではあるが急に折れ曲つている。これは、屈折面とよばれば、この面を境にして結晶の底面が屈折したことがわかる。
- 9 積雪粒子の劈開の例。粒子 A, B の矢印をつけたところに、粒子に割れ目が見られる。これらはいずれも、結晶底面にそつた割れ目で、劈開と考えることができる。

図 版 III

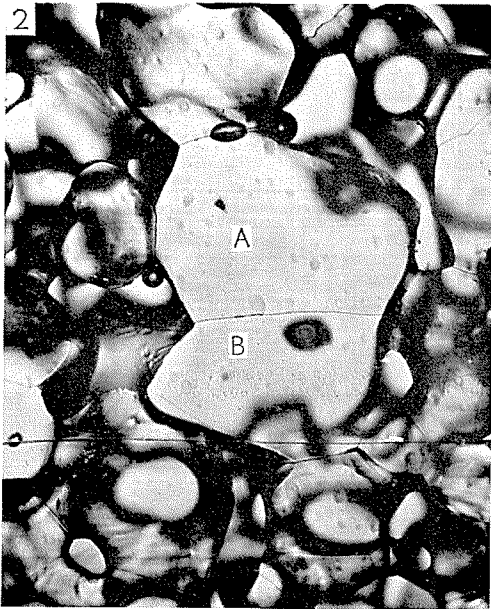
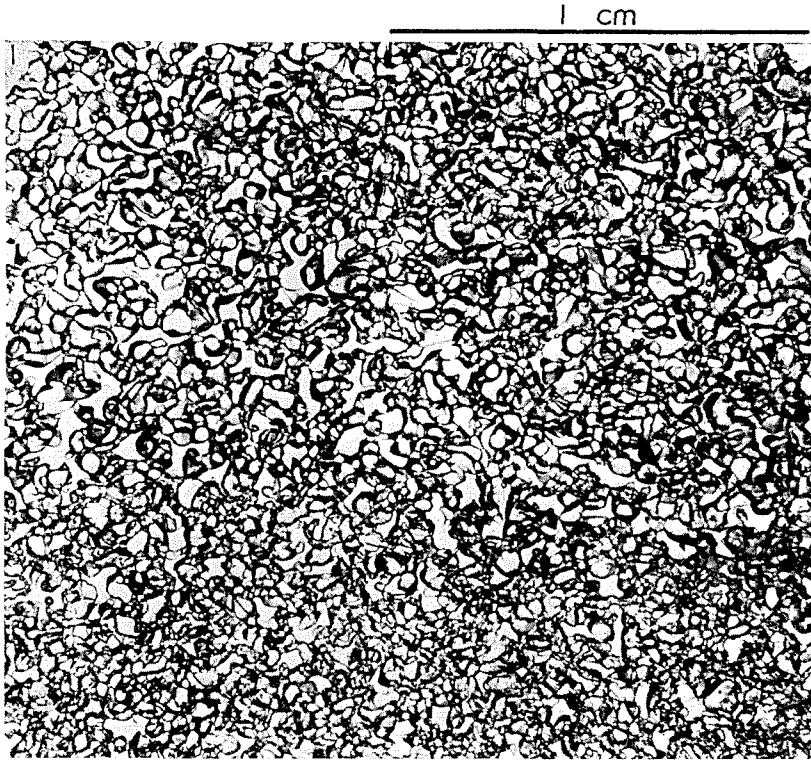
- 10 薄片 33 の弱線附近の組織の一部。A, B, C …… などの記号をつけた氷粒子の列にそつて弱線が破線で示してある。
- 11 10 に示した薄片を左右から 13% 圧縮した結果、10 と同一部分の組織は 11 のようにかわつた。圧縮の結果、弱線にそつて存在していた広い隙間の大部分は失なわれて、弱線はほとんど消えてしまつた。

図 版 IV

- 12~16 薄片が塑性変形をうけつつ、その組織をかえて行く有様を示した。12 は圧縮前の薄片 33 の一部である。13 は、圧縮の途中、降伏点をすこしすぎて、歪 $\epsilon=0.02$, 反抗力 $R=400 \text{ gr-wt/cm}^2$ に達したときの状態である。粒子 A には底面迂りによる迂り線が現われ、粒子 A は上下 a, b ふたつの部分に分れた。14 は $\epsilon=0.03$, $R=435 \text{ gr-wt/cm}^2$ になつたときの状態。15 は、 $\epsilon=0.07$, $R=640 \text{ gr-wt/cm}^2$, 16 は、 $\epsilon=0.128$, $R=1000 \text{ gr-wt/cm}^2$ に達したときの状態である。変形が進むにつれて、底面迂り、粒界迂り、細胞化、再結晶、粒界の移動などの現象が見られる。
- 17 積雪粒子に生じた結晶格子の歪みの例。粒子 A の迂り線は曲つていて、結晶格子が歪んだことを示している。

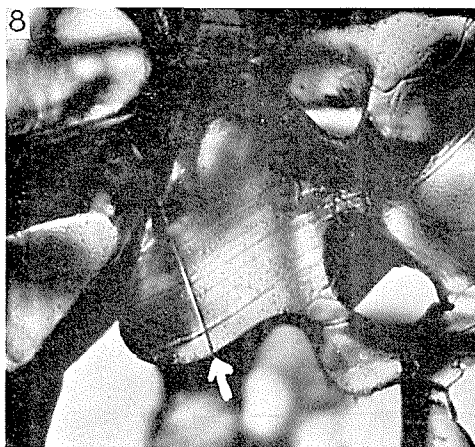
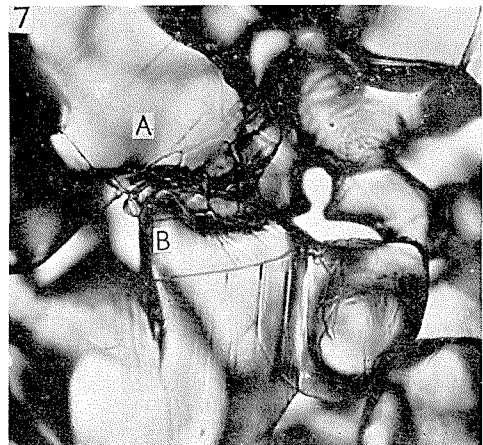
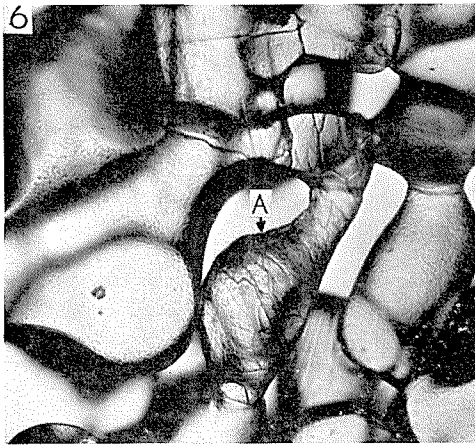
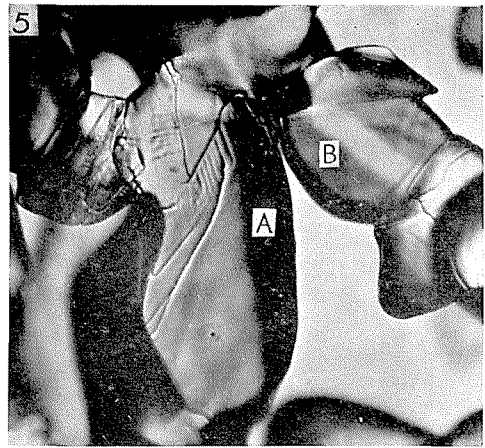
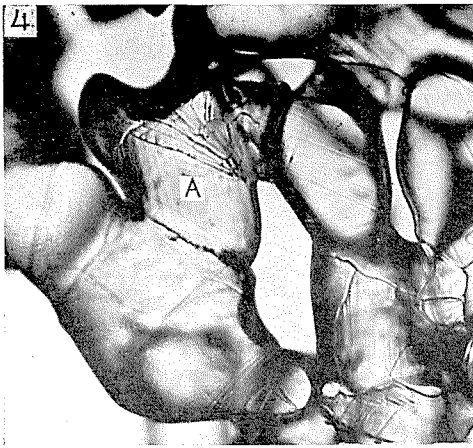
図版 V

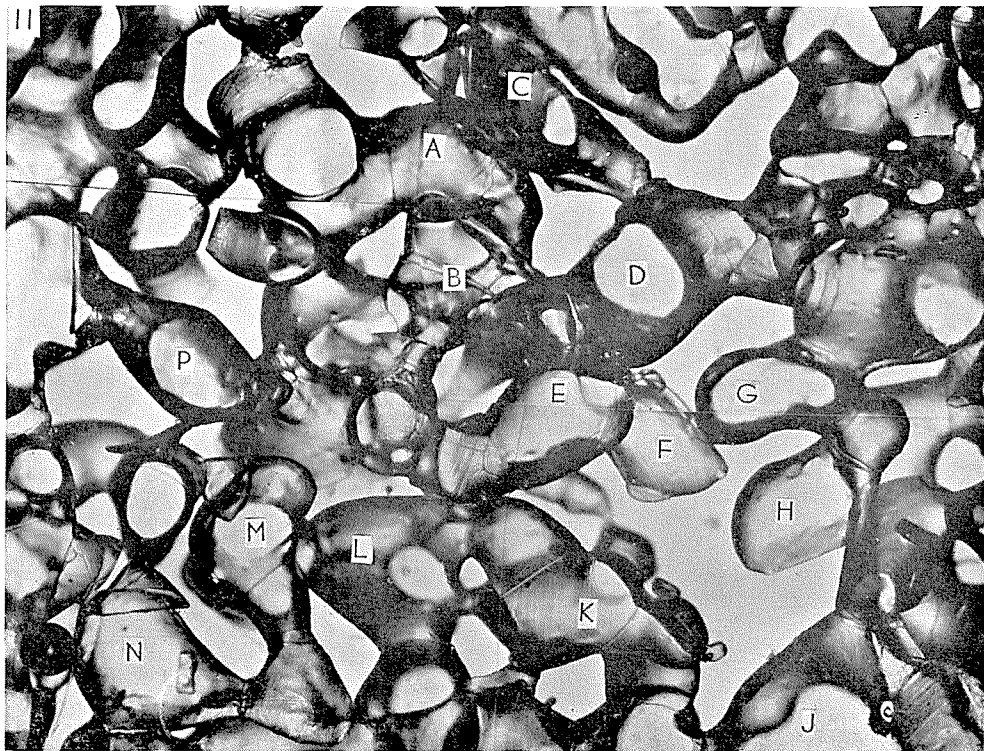
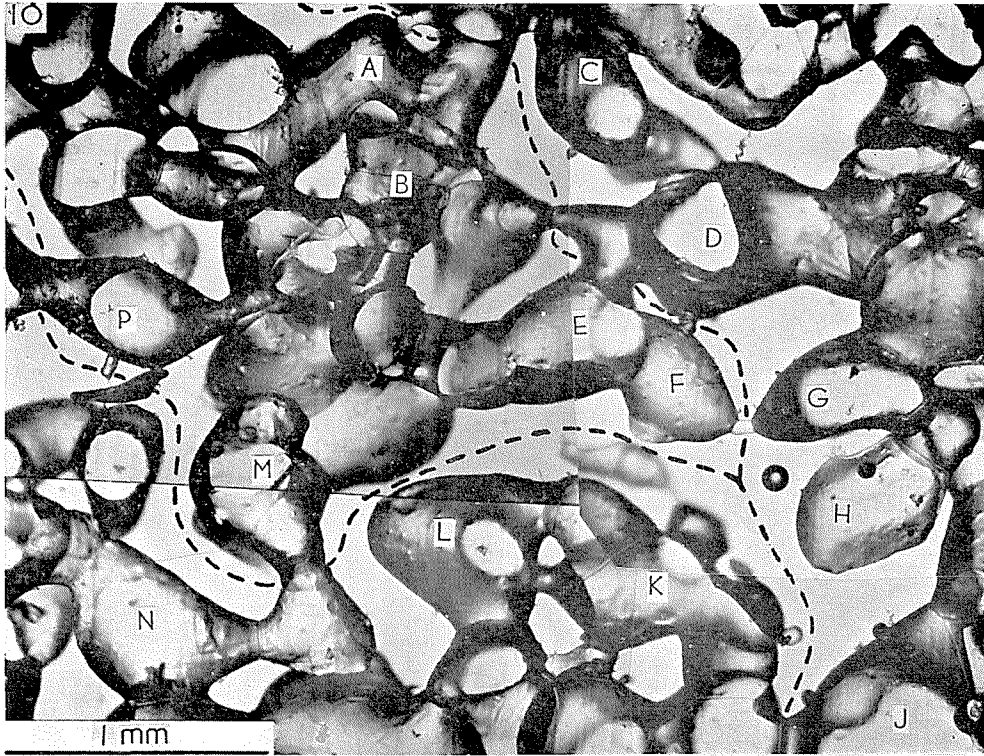
- a ; 積雪粒子間の結晶粒界の移動の例。この部分は、図版 I-2, 3 に示したのと同じところである。この写真には、粒界移動のほか、底面沁りによる沁り線、再結晶なども、中央の大きな粒子に見られる。
- b ; 積雪粒子の細胞化の例。写真中央の黄色がかつた粒子は、細胞化をおこして、小さな結晶粒に分れたことがわかる。
- c ; 積雪粒子に生じた屈折面の例。写真中央の大きな粒子に、左上から右下に向つて 1 本の線が見え、この線を境にして底面沁りによる沁り線が急に折れ曲つているのがわかる。
- d ; 粒界沁りと再結晶の例。写真の右側に見える青い色の粒子と赤紫色の粒子との結晶粒界で、沁りをおこして食い違つている (粒界沁り)。また、写真の左側の、沁り線を生じた黄色い粒子の右下隅に見られる紫色の小さい結晶粒、および同じ粒子の左上方に見られる濃い桃色の結晶粒は、いずれも粒子がそこで再結晶をおこしたことを示している。

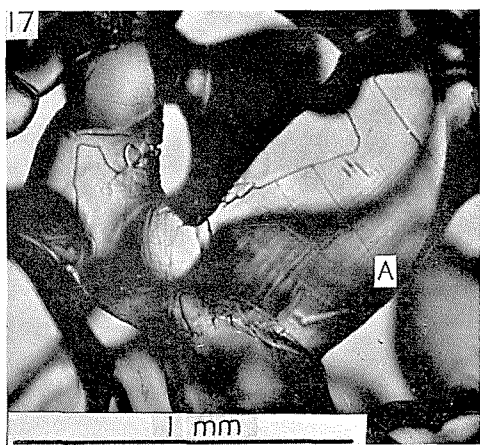
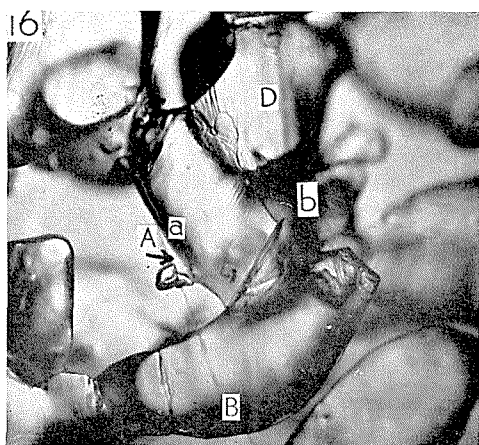
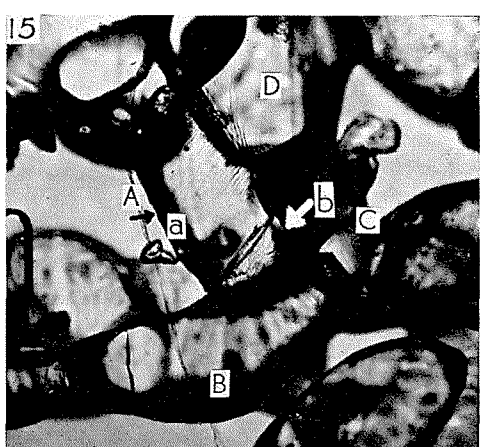
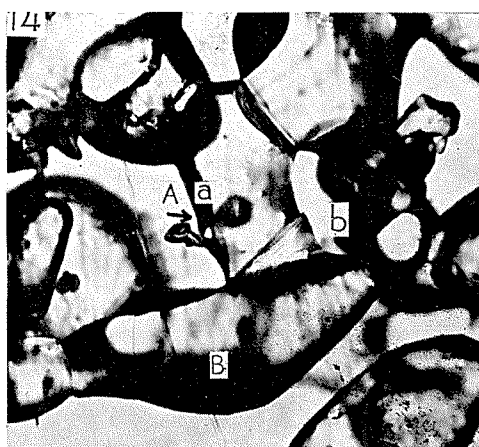
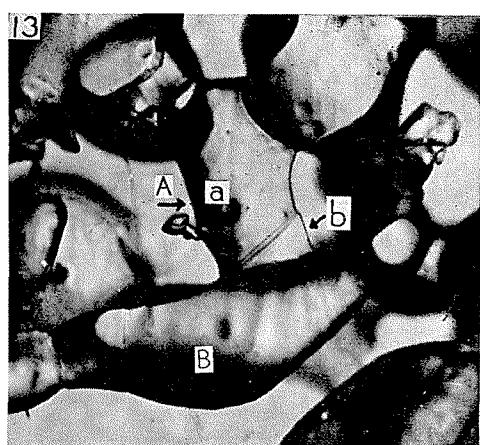
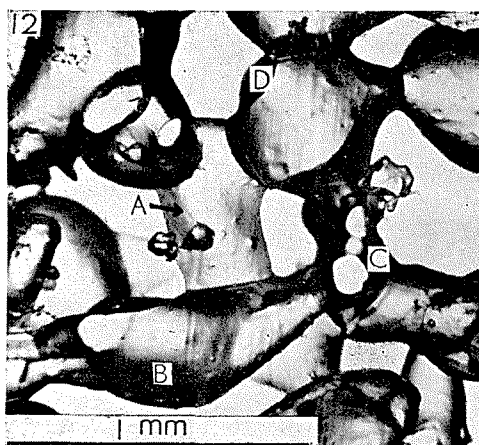


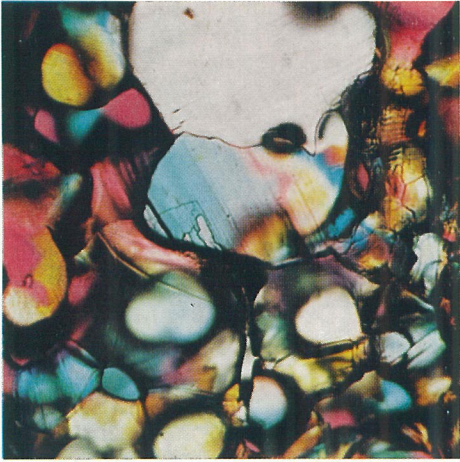
1 mm

1 mm

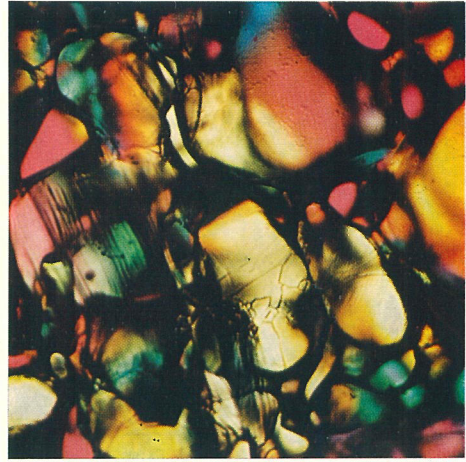




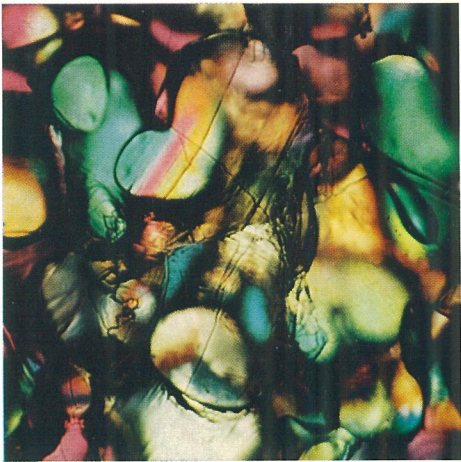




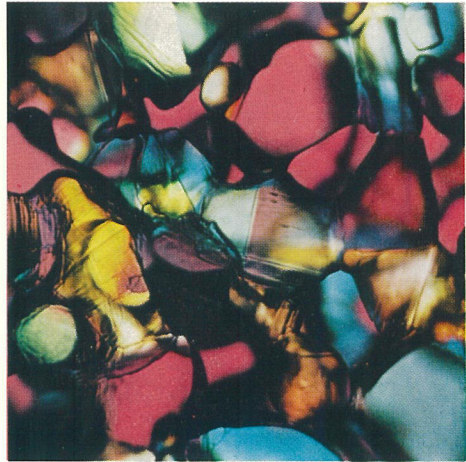
a



b



c



d