HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	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
Author(s)	若浜，五郎
Citation	低温科學. 物理篇，19，37-71
Issue Date	1960-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17967
Type	departmental bulletin paper
File Information	19_p37-71.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Gorow WAKAHAMA 1960 Internal Strain and Changes in the Microscopic Texture of Snow Caused by Compression, I. Compression of a Thin Section of Snow by a Static Load. *Low Temperature Science, Ser. A, 19.* (With English résumé p. 68)

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——

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

積雪が，弾性的性質と同時に，強い塑性的性質を示すことはよく知られている。たとえば，四角に切り出した積雪の棒の一端を固定して，水平にささえ，他の端におもりをかけると，この棒は破壊せずになめらかに曲がる。また，柱状に切り出した積雪をゆつくり圧縮すると，柱は連続性を保つたまま変形して，最初の長さの半分にも縮つてしまう。このような積雪全体としての塑性変形のようす，積雪が示す反抗力などの巨視的な性質は，今までいろいろ研究されてきた。しかし，その場合，積雪の顕微鏡的組織のどの部分が，どのように変化するか，という微視的な事柄に関する実験や観察は，従来全く行なわれなかつた。そのおもな理由は，積雪を自由に薄片に切ることが出来なかつたことにあると思われる。顕微鏡の下で組織をみるためには，積雪を薄片にする以外，いまのところ方法がない。

昨年，木下・若浜[1]は，アニリン固定法による積雪の薄片の製作法を考案した。そして，どんな積雪でも容易に薄片にすることが可能になつた。薄片に力を加えると，薄片全体の巨視的変形にともなう積雪組織の微視的変化の過程を顕微鏡の下で直接追うことができる。筆者は，この方法を用いて，従来は推測の域をでなかつた積雪内部の微細な変化を調べ，その結果を，最近とくに目ざましい進歩をとげつつある金属物理学や粉体学と比較，対照し，積雪組織の力による変化について，いくらかの考察を試みた。

II. 実験の方法と装置

積雪の試料にまず力を加えて変形させ，その変形した試料から薄片を切り出して観察しても，積雪の組織の受ける変化は知ることができる（このことは，木下・若浜[1]のアニリン固定法による積雪の薄片の製作についての論文にも簡単に述べてある)。木下[2]は，高さが約半分になるまで塑性圧縮した積雪の柱から切り出した薄片と，同じ雪ではあるが変形していない雪から切りとつた薄片とを比較して，積雪の組織にいろいろな差異をみいだした。この差異は，明

* 北海道大学低温科学研究所業績 第576号

らかに変形によるものである。しかし，この方法では，同一の雪についての変化がみられるわけではないので，組織におこる変化についての知識も，統計的なもの以上にでることはできない。これに反して，まえがきでのべたように，自然の状態の積雪から，まず薄片をつくり，力をかけて変形させつつ，その組織が変化して行く過程を顕微鏡の下で直接かつ連続的に観察すれば，組織の変化の経過を正確に知ることができるわけである。実験，観察は，−8°～−12°C の低温実験室で，厚さ 0.5～0.7 mm，辺の長さ 2～3 cm の長方形の薄片を側方から一定の力で圧縮して行なつた。

(1) 薄片試料の製作

実験試料に用いる薄片は，雪の資料を −5°C ぐらいの温度で，融点が −12°C の水で飽和したアニリン液にひたし，温度を −20°C 以下にさげてアニリンを凍らせ鉋でけずつて作つた。このアニリン法については，すでに発表してあるので[1]，ここではただ，この実験に使用する薄片試料を作るにあたつて特に必要なことについてだけ述べることにする。

薄片を圧縮変形させる際，一様な応力が薄片に加わるようにした。そのためには，薄片の力を加えられる相対する二辺は，完全に直線的で，かつ平行でなければならない。それで，薄片にする前に，アニリンで固めた積雪の各面に鉋をかけ，キャリパーで測りながら，なるべく完全な直六面体の試料を作る。各辺の長さを測定し，記録する。実際に用いる試料の大きさは大体 2～3 cm 角のものである。さらに，めんみつに鉋をかけて，できるだけ平らな一面を作りこの面を下にして，直六面体の試料をガラス板にのせる。少しあたためてアニリンだけをとかし，再び温度を下げてアニリンも凍らせると，積雪試料はガラス板上に密着，固定する。ここでふたたび鉋をかけて薄片にするのであるが，今のばあい薄片にはあとで力をかけるので，あまりうすくするわけにはゆかない。積雪の粒度や強度によつて異なるが，0.5～0.7 mm の厚さが適当である。薄片全体にわたつて，厚さは一様でなければならないが鉋をかけるとき，どうしても周縁部をけずりすぎて，薄片の中央部より薄くしがちである。資料の周縁に水飽和アニリンを多量にぬりつけて，かたまらせておくと，比較的容易に，一様な厚さの薄片が得られる。以上は，すべて −20°～25°C の温度で行なわれるが，ここで薄片を −12°C 以上にあたためて，薄片の空隙をつめていた固体アニリンをとかす。とけたら，すぐ，薄片にカバーグラスをかぶせる。この場合，カバーグラスを薄片に無造作にのせると，ガラスと薄片との間に，多数の気泡が入つてしまう。それをさけるには，カバーグラスの一端を薄片の一端にのせ，ガラスの他端を静かに下してかぶせるとよい。薄片とガラスの間の空気は次第に押し出されて，気泡が入らない。このような薄片，つまり，空隙が液体アニリンでみたされた積雪の薄片を左右から圧縮する。したがつて，以下のべる実験は，すべて −12°C 以上の温度で行なわれるわけである。

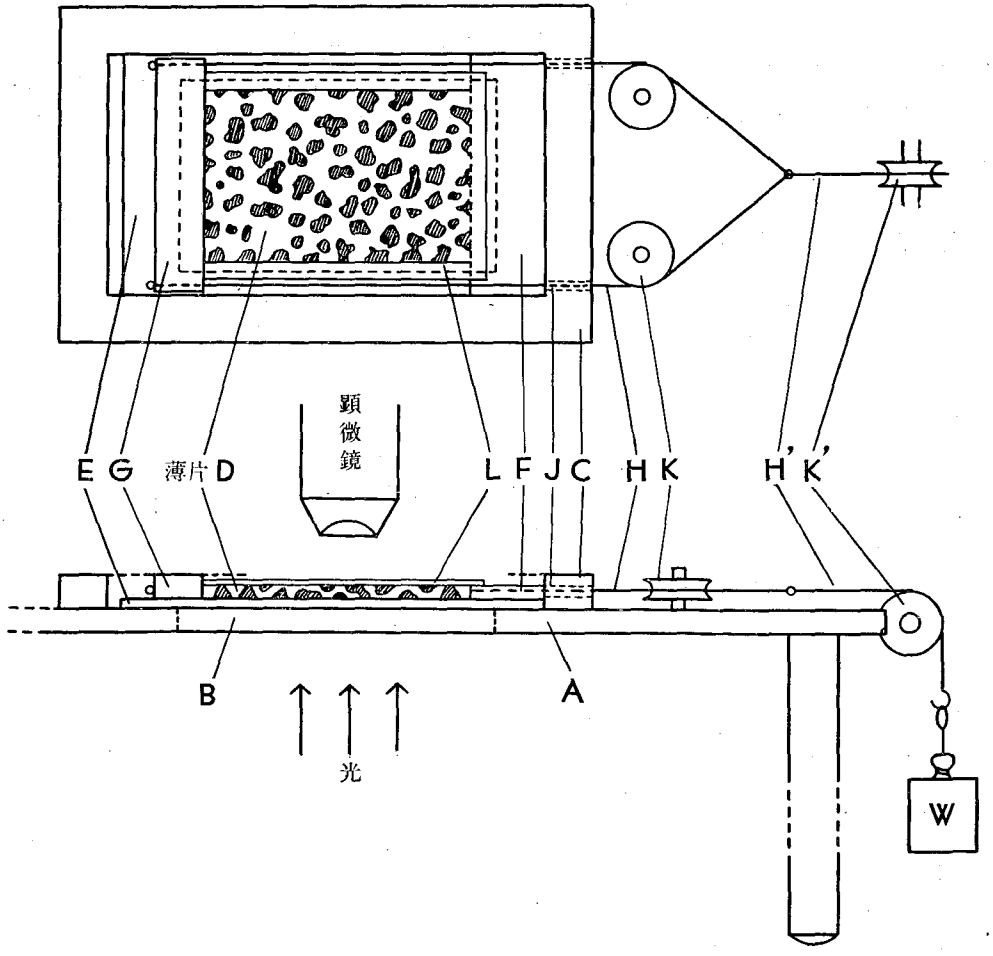
圧縮する前に，薄片全体の組織を顕微鏡写真にとる。メカニカルステージを使つて，薄片を少しづつ前後左右に移動し，あいつぐ視野を 1/3～1/4 くらい重複させながら，薄片全体の写真をとる。3 cm 角くらいの薄片だと，総合倍率 7～8 倍の低倍率のレンズ系を用いても，薄

片全体の写真をとるのに約100こまの撮影が必要である。

同時に，薄片の厚さを正確に測定する。顕微鏡の微細照準装置を使つて，焦点を薄片の上面に合わせたときの測微らせんの目盛を読みとる。次に，アニリン液を通して見える薄片の下面に焦点を合わせたときの目盛をよみとる。その目盛差を x とすると，それにアニリンの屈折率 $n(n=1.586)$ を掛けた値 $n\cdot x$ が薄片の厚さである。薄片の数カ所について厚さを測定し，その平均をとつて，その薄片の厚さとする。

(2) 薄片圧縮装置

薄片の圧縮は第1図に示した圧縮装置で行なつた。真鍮の板Aが薄片をのせる台で，A



第1図　静荷重で積雪の薄片を圧縮する装置

A; 薄片をのせる台。B; 台Aにあけた長方形の穴。C; 長方形の真鍮のわく。D; 薄片。E; 薄片Dをのせるガラス板。F; 厚さ0.7~0.8 mmのガラス板。G; 薄片を圧縮する金属片。H, H'; おもりWによる荷重を金属片Gにつたえる糸。J; わくCにあけた孔。K, K'; 滑車。L; 薄片Dにかぶせるカバーグラス。W; おもり。

には4本の足があつて，顕微鏡の載物台をまたいでおかれる。薄片は，Aの中央にあけた長方形の穴Bのところにのせられる。穴の周りは長方形の真鍮のわくCが，Aにとりつけてあり，薄片Dをのせたガラス板Eが，このわくCの内側に丁度はいる。薄片の右の縁は厚さ0.7～0.8 mmの細長いガラス板Fを介して枠Cで支えられ，薄片の左の縁は金属片Gによつて右の方に押される。

Gの両端近くにとりつけた2本の糸Hは，わくCにあけた孔J，二つの滑車Kをへて，1本の糸H'に連結され，他の滑車K'をへて，下方にたれ下つている。H'を引張ると，金属片Gは，薄片Dと，その上にかぶせたカバーグラスLを押しながら，ガラス板E上を静かに動く。薄片が，ガラス板Fの左の側面に接触し，Fの右の側面が，わくCに接触するまで，糸H'を静かに引張る。このとき，薄片上のカバーグラスLの1端はGに接触しているが，他の端はガラス板F上にあつて，自由端になつている。薄片Dは，全体が液体の水飽和アニリンにつかつた状態で，カバーグラスLによつて完全に蔽れている。こうしておけば薄片には，空気と直接ふれるところがなく，薄片の昇華変形がふせがれる。

台Aの高さは，偏光顕微鏡の載物台の上面より僅かに高くしてあり，顕微鏡の下部を台Aの下に入れると，対物レンズが薄片Dの直上にくるように設計してある。光源を出た光は顕微鏡の反射鏡で反射され，台Aにあけた穴Bをへて，薄片Dを下から照明する。

金属片GおよびガラスFとが薄片に接触したことを顕微鏡の下で確認してから，糸H'の端におもりWをかける。この際，薄片に僅かの衝撃でも与えると，薄片は一部破壊する。充分注意して，静かに荷重しなければならない。おもりWには30～100 grのものをつかつたが滑車などの摩擦，約15±3 gr-wtがあるため，実際に薄片にかかる力は15～85 grであつた。これを薄片の断面積でわれば，薄片にかかる単位面積当りの圧縮応力として大よそ100～500 gr-wt/cm^{2}がえられる。力を加えた後，−5°～−12°Cの範囲のある一定温度に保つた恒温箱に入れておく。薄片は塑性的に変形して，左右の方向に縮んでゆくのが，肉眼でもわかる。適当な時間間隔をおいて，3～4回，前に述べた要領で，薄片全体の写真をとる。実際には，力を加えてから1日後，2～3日後，5～6日後にとつた。また，その時どきに，積雪の組織に目立つた変化をおこした部分を，高倍率の対物レンズを用いて写真にとつた。こうして薄片を10～20%圧縮変形させたのち，実験をやめた。

(3) 写真の整理

圧縮のはじめ，また，途中で薄片全体にわたつて3～4回撮影した数百枚の写真は，全部同じ拡大率で一度にやきつける。これらの写真は，圧縮のはじめ，また，圧縮の各段階ごとについて，薄片全体にわたる大きな写真にする。数十枚から百枚以上もある写真をはり合わせて一枚の大きな写真にする場合，隅から隅まで互にずれないようにはり合わせることは非常に難しい。しかし，不可能ではない。こうして正確にはり合わせた写真が薄片組織の変形に関する解析の基礎になる。はりあわせ方は次のようにするとよい。まず，薄片の中央附近の，互に隣接した写真の3行，3列，計9枚をえらび，互に少しもずれないようにして台紙にはりつけ

る。9枚くらいなら，割合簡単にはりつけられる。この9枚の写真を基にして，順次その周囲の写真をはり合わせて行く。この場合も，1枚1枚はりつけるのではなく，となり合つた3～4枚の写真を同時にはり合わせる。こうすれば，百枚くらいの写真でも，互にずれることなく，1枚の大きな写真にはり合わすことができる（図版II-7参照）。

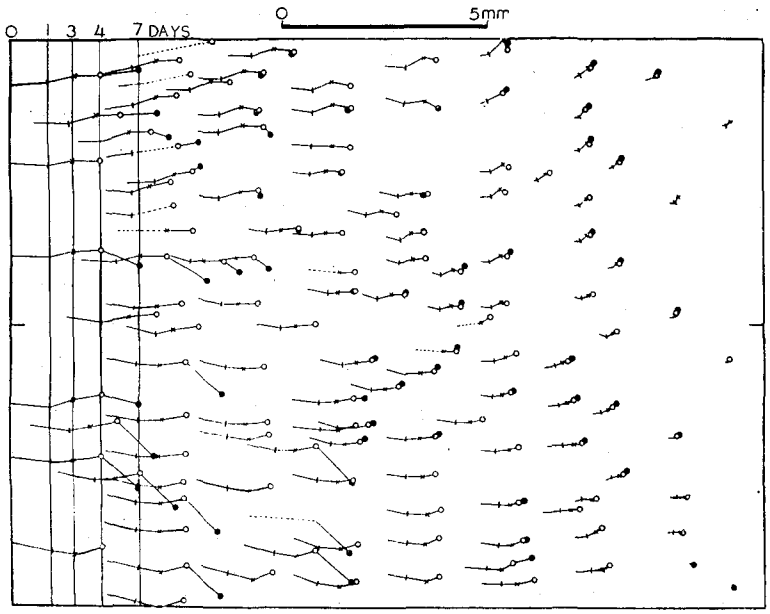
III. 積雪組織における基本領域と弱線部分

変形させる前と，力を加えてからとつた写真を詳しく比較すると，圧縮によつて，積雪組織を構成している氷粒に，外形の変化とともにいろいろな種類の内部変化がおこつたことがわかる。その代表的な例を，図版Iの1～6の写真に示した。この図版の左側の写真はすべて，力を加える前の薄片の一部であり，右側は，それぞれ，力を加えて変形させてからとつた同一部分の写真である。積雪組織は多くの単結晶領域に分れているが，写真1, 2は，この氷の単結晶粒子の結晶粒界辷りの例である。ひとつの氷の粒子は全体がひとつの単結晶であることもあり，その内部が数個の単結晶領域にわかれていることもある。写真1で矢印をつけた結晶粒界A, B, Cが辷りをおこし，それが写真2で単結晶粒子のあいだの食い違いとして現われた。写真3, 4は，単結晶の底面(0001)の辷りによる変形の例である（底面辷り）。写真3の矢印をつけた粒子が，その結晶の底面で辷りをおこして変形しているのが，写真4で見られる。また，写真5, 6は粒界剝離の例を示す。はじめは結晶粒界で接合していた2個の粒子（写真5の矢印のところ）が，力をうけた結果，粒界のところで剝離したのである。これは一種の局所的な破壊だといえよう。このほかに，粒子間の結晶粒界が力をうけて移動する歪粒界移動，ひとつの単結晶粒がさらに小さな結晶粒に分れる細胞化なども観察されたが，主なものは，上に述べた粒界辷り，底面辷り，局所破壊の3つの型である。これらの変化については，あらためて後に詳しく述べる予定である。

しかし，ここに例としてあげたような明瞭な変化が，薄片の組織の中，どこにでも見られるというわけではない。このような変化をおこした粒子の数は，全体の粒子の数にくらべるとかなり少ないのである。ばあいによつては，認められるようなはつきりした変化をおこした粒子がみあたらないこともある。しかも，現実には，試料は全体として変形しているのであるから，試料を構成している氷の粒子は，少なくとも外形の変化，相互位置の変化など，幾何学的変化をおこしているにちがいない。それで，まず，そのような幾何学的変化をしらべることにする。

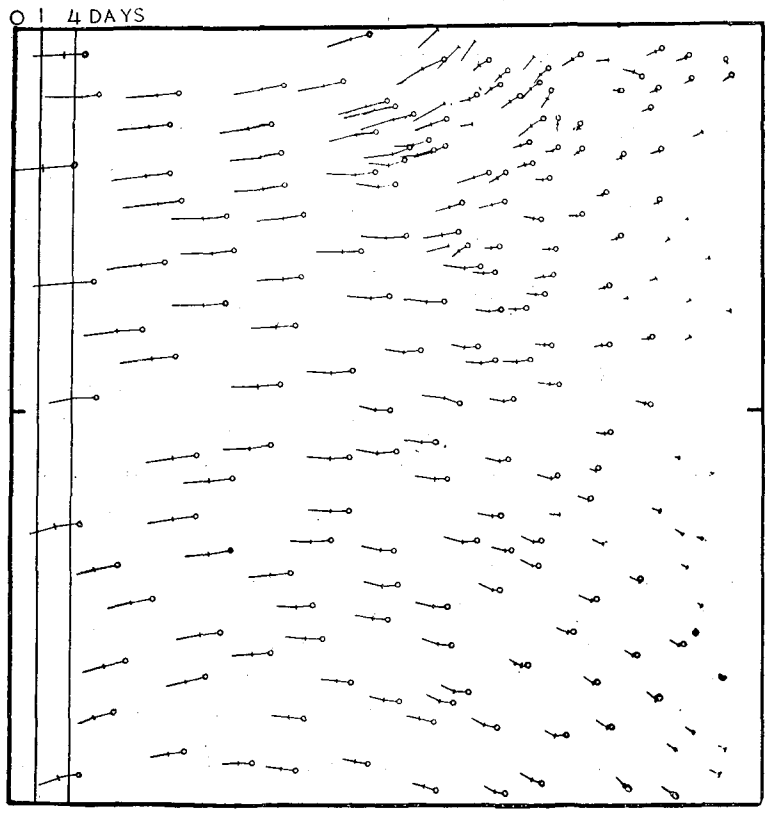
(1) 積雪組織の「流動図」

変形させる前と，変形させてから後に撮影した薄片全体の写真を比較すると，積雪のどの部分が，どのように形をかえ，位置をかえたかがわかる。図版IIに，密度が0.381の「しまりゆき」の薄片（薄片試料第12番，今後これを単に「薄片12」という）の変形前の写真7と，4日間20 gr-wtの力を加えられて，約10%圧縮変形したときの写真8とを示した。これについて，結晶粒界を示す線の端，あるいは粒子の輪郭が角になつていたり，あるいはくびれている



第2図 積雪組織の圧縮流動図 (薄片 12)

薄片の代表点が．圧縮をはじめてから 1 日後 (+印の位置) 3 日後 (×印), 4 日後 (白丸), 7 日後 (黒丸) にとつた位置を線でつないで示した。



第3図 薄片 14 の圧縮流動図

圧縮をはじめてから 1 日後 (+), 4 日後 (白丸) にとつた代表点の位置をつないで示した。

ところなど，見わけがつきやすい目印の点を全体にわたつて択び，それが圧縮によつてどのように変化したかをしらべることにする。これによつて，試料の各部分が形をかえ，位置をかえる有様がわかるであろう。

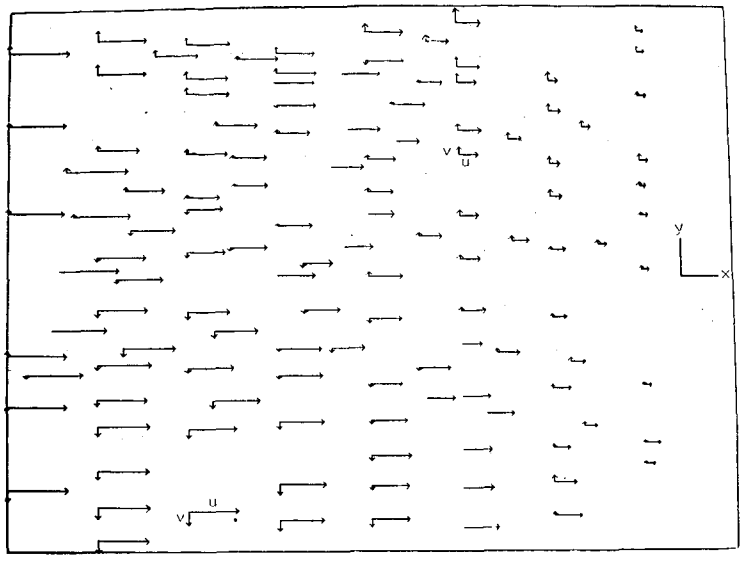
先ず，変形させる前の写真に，トレーシングペーパーをあて，全体を正確にうつしとる。それを，力を加えてからとつた写真の上に，試料に力を加えたふたつの端面（写真の上では直線）の一方が互に一致するようにして重ねる。この一致させた端面を表わす線を基準線となずける。なお，試料は圧縮によつて幅がひろがり，端面は長くなる。それで，上のように端面をあわせて重ねるとき，圧縮前後の端面の中央が合致するようにする。この端面の中点を基準点と呼ぶことにしよう。それから，上にのべた目印になる点はその点の附近にあるいくつかの氷の粒子の位置を代表するという意味で**代表点**とよぶことにする。第2図は，図版IIの薄片の代表点が，圧縮とともに，1日後，3日後，4日後，7日後にとつた位置を線でつないで示したものである。この図を積雪組織の「**圧縮流動図**」とよぶことにする。流動図は，基準線の上の代表点が空間的に動かないとしたときの代表点の変位を表わす図である。流動図のもうひとつの例として第3図をあげる。これは図版IIIの，密度が0.386のしまりゆきの薄片（薄片14）についての流動図である。これらの流動図を見ると，積雪の組織の各部分が規則的な変位をするものでないことがわかる。以上えられたのは，雪の組織各部の変位であるが，これから組織各部分の変形をつぎの項で求めることにしよう。

(2) 積雪組織における基本領域と弱線部分

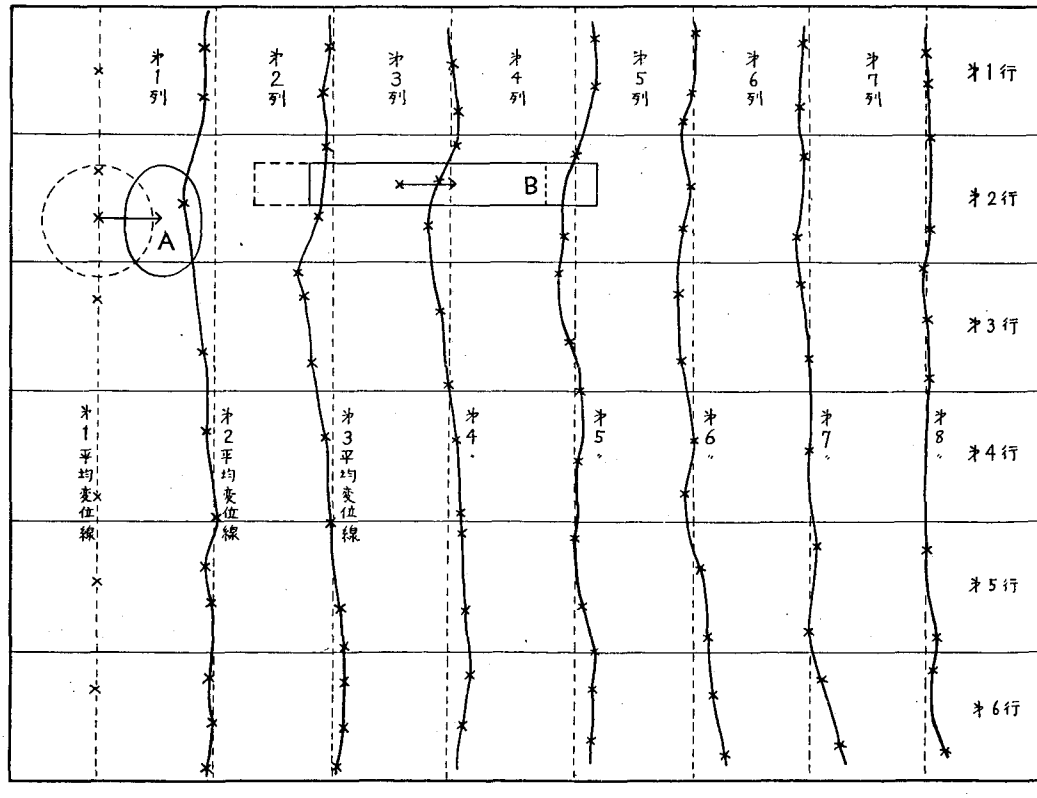
圧縮方向に坐標 x，それに垂直に坐標 y をとり，代表点の変位の x-成分，y-成分をそれぞれ u，v とする。もし，変形が小さければ歪の成分

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \qquad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \qquad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

によつて x，y 方向の伸長，圧縮（ε_x，ε_y が正の時は伸張，負のときは圧縮）および剪断歪がえられる。今のばあい，変形は必ずしも小さくはないが，これら歪成分によつて変形の有様を近似的には表わすことができる。第4図は薄片12の代表点が，圧縮をはじめてから4日のあいだにおこした変位の水平，垂直成分 u，v を示す。このあいだに薄片は x 方向に12%圧縮された。薄片の形は直方形で，その平行な相対する側面に圧縮力を加えたのだから，薄片内部に生ずる応力は一様である。それゆえ，もし薄片の組織が機械的に一様ならば y 軸に平行な線上にある代表点の変位の x 成分 u は，互に等しくなる筈である。この簡単な平均変位から実際の変位がどれほど外れているかを見れば実際の積雪のなかでおこる変位の特徴をとらえることができるであろう。そこで y 軸に平行な数本の線で薄片を等分し（第5図参照，薄片12では8列に等分した），その線上にある代表点の u を調べてみた。これらの線を左から順次，第1線，第2線，第3線，……（薄片の左端を第1線とした），また，これらの線で等分された領域を左から，第1列，第2列，第3列，……と名付ける。同様にして，x 軸に平行な線で薄片を等分し，それらの領域を上から，第1行，第2行，第3行，……と名付ける。

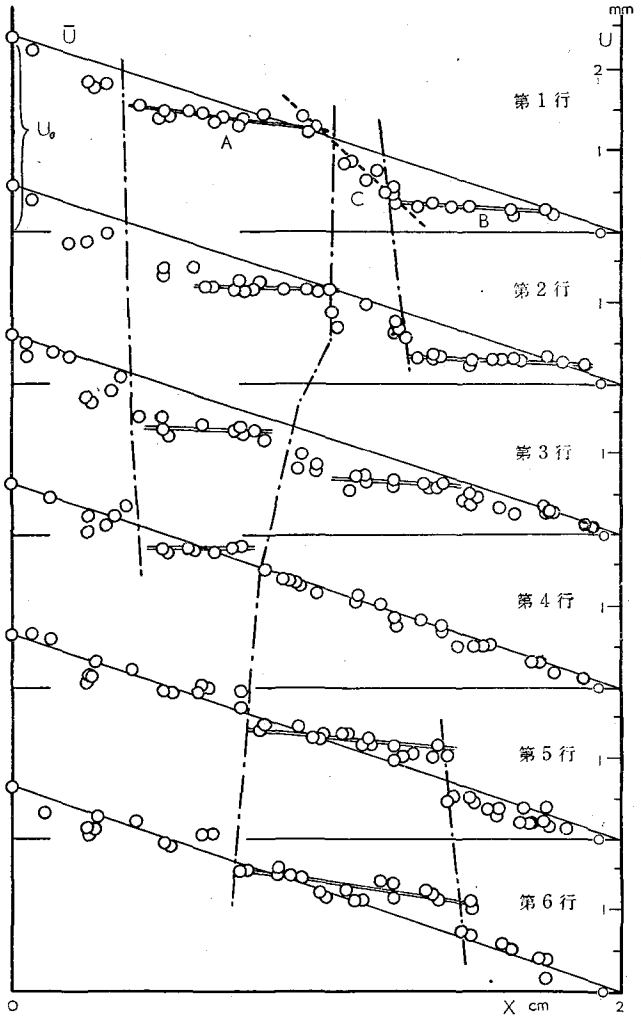


第4図 薄片12の代表点が，圧縮をはじめてから4日の間におこした変位の水平，垂直成分 u, v を示す。



第5図 圧縮前，y 軸に平行な同一直線上にあつた薄片12の代表点が，12%圧縮後には図の実線上の×印の点に動いた。圧縮がもし一様におこるならば，代表点は点線で示した平均変位線上の点に移動するはずであるが，実際にはかなりずれた位置に移動したことがわかる。

このように，薄片を y 軸に平行な線で n 等分したとき，薄片内部の圧縮が一様ならば，すなわち $\frac{\partial u}{\partial x}$ が一定ならば第1線の水平変位 u_1 は，試料左端の変位 u_0 に等しく，第 m 線の水平変位 u_m は $(n-m+1/n)\cdot u_0$ に等しいはずである。第 m 線が，u_m だけ x 方向に動いたのちの線を，第 m 平均変位線とよぶ。第5図の点線が，これら平均変位線である。第1線上の代表点は，薄片の端の点であるから，それらの点における u はすべて u_0 に等しく，各点は第1平均変位線上に動いている。しかし，第2線，第3線……上の各代表点は，実際には，それぞれの平均変位線上に必ずしも移動していない。各線ごとに，その代表点のベクトル u の先端を滑らかな曲線で結んでみると，このことが更にはつきりする。第2線，第3線の下半分では，u の分布は比較的一様で，u の値は平均値に近い。しかし，上半分では u が平均値よりも小さくこの傾向はそのまま第3線以下にも残つている。これは，第1線（薄片の左端）と第2線の間，代表点の位置が平均変位線から左にいちばん外れた部分（Aとした部分）に，積雪組織の弱いところがあつたとして説明される。この弱い部分は圧縮の初期においてすでに大きな圧縮変形をうけ，その結果，外力が第2線から右の方に充分伝わらず第2線以下も平均値以下の変位しかおこさなかつた。第5図でBと印した長方形の部分では，第3，第4，第5線の変位が，ほとんどあいひとしい。つまり，この部分は変形をおこさず全体として移動しただけである。その原因は外力が充分につたわつてこなかつたためであろ



第6図　薄片12の各行ごとに，代表点の変位 u が x とともにどのように変るかを示した u—x 図。各行ごとに左上から右下にかけて走る直線 $\bar{u}$ は，変位の平均水平成分を与える線である。水平変位成分 u は，連続的に滑らかに変化していないで，鎖線でつないだ部分で不連続的に，階段状に変化していることがわかる。

うが，あるいは，この部分が特に丈夫であつたためかもしれない。

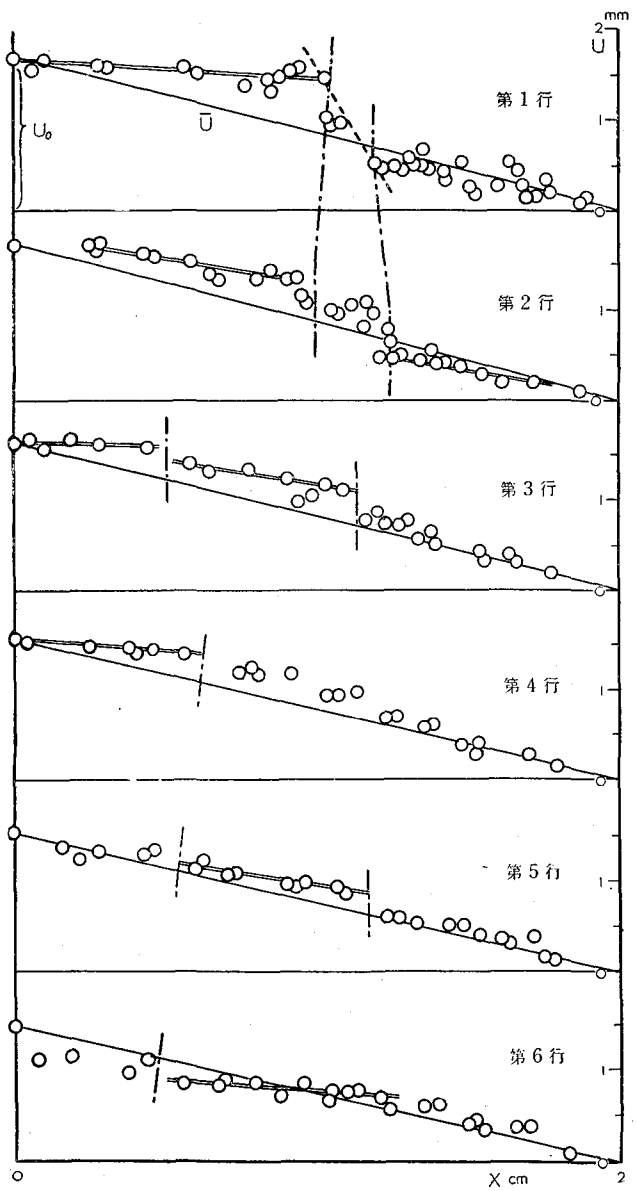
以上のような変位と変形との関係を更に明瞭にするため，に，第5図を水平な直線で分割した各行について，代表点の変位 u が x とともにどのように変るかを示してみよう。第6図，第7図が，図版 II-7 の薄片 12，図版 III-9 の薄片 14 の $u-x$ 図である。薄片の左端の変位成分を u_0 とすると，各行の中の任意の点 x における変位の平均水平成分 $\bar{u}$ は直線

$$\bar{u} = -\frac{u_0}{a}\,x$$

(a は薄片の x 方向の幅) で，x 方向の平均圧縮は

$$\bar{\varepsilon}_x = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = -\frac{u_0}{a}$$

で与えられる。積雪組織の各点の実際の動きの水平成分 u は，一般に，この直線から外れている。この直線からの偏差を $u-\bar{u}=\Delta u$ で表わす。



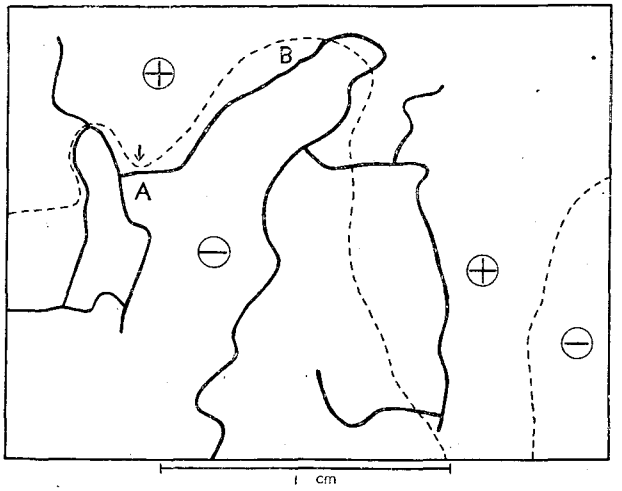
第7図 薄片 14 の $u-x$ 図。第6図に示した薄片 12 と同様に，u が不連続的に変化しているのがわかる。

第6，7図を見て目立つことは，水平変位成分 u が，連続的に滑らかに変化していないで，階段状に，不連続的に変化していることである。階段の水平に近い直線部分では，その長さにひとしい積雪の組織全体が，多少の圧縮はうけたとしても，大体において，単に平行移動したことになる。言葉をかえていうと，この部分では，積雪組織の各点の間の相対的な変位が非常に少なく，組織は小さな変形しかうけなかつたのである。この部分を**基本領域**となづけよう。基本領域の変形は，$u-x$ の関係を示す直線の傾きで表わされるが，第6図の第1行の A と印した基本領域の圧縮率 $\frac{\partial u}{\partial x}$ は，

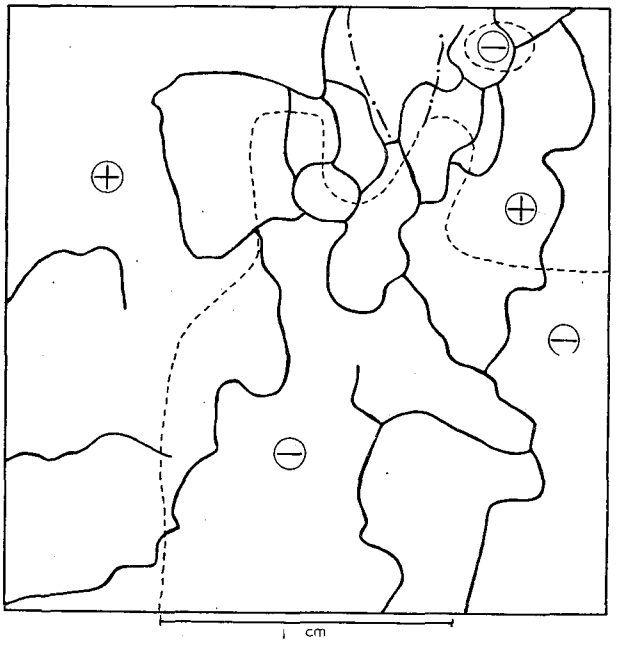
平均圧縮率 $\frac{u_0}{a}$ の約 $\frac{1}{3}$ であり，Bと印した基本領域の圧縮率は平均の約 $\frac{1}{5}$ にすぎない。

一方，階段の段に相当するところは，積雪組織の変形が非常に大きいところである。たとえば，第6図の第1行，Cと印したところで $\frac{\partial u}{\partial x}$ を求めると，平均値の3倍近くの圧縮率がえられる。この値はAの部分の圧縮率の約8倍，Bの部分の圧縮率の約15倍に相当する。第1行についてだけ言えば，全体の圧縮量の約37%が，Cの部分1カ所に集中的におこつたのである。このような圧縮の甚しい不連続部分は，第6図，第7図の各行ごとに2～3カ所づつ存在し，図に示したように鎖線でつなぐことができる。u—x 曲線の不連続部分は，薄片の平面内で，ある線にそつてつながつているわけである。圧縮をひどくうけるこのような線にそつては積雪の組織は弱いにちがいない。それで，この線を**弱線**と名づける。これに反して，弱線以外の，さきに基本領域となづけた部分は，組織が丈夫なはづである。

このように，積雪の内部には，機械的に強い基本領域と弱い弱線部分があり，強い部分は弱い部分でかこまれていることがわかつた。第8, 9図の太い実線が，第2図の薄片12，第3図の薄片14の弱線で，弱線でかこまれた領域が，基本領域である。基本領域の大きさは，密度や雪質によつて違うけれども，密度が



第8図　積雪組織の弱線を太い実線で示す（薄片12)。弱線でかこまれた領域が基本領域である。破線は代表点の垂直変位成分 (v) が $v=0$ の線。$v=0$ の線で境された領域に，v が正か負かを ⊕ 印，⊖ 印で示してある。弱線のA，Bと印した所で，後にのべる粒界剝離がおこつた（第VII節3項参照)。



第9図　薄片14の弱線（太い実線）と基本領域（弱線で囲まれた領域)。破線や ⊕，⊖ 印の意味は第8図と同じ。図の上方の鎖線はその左右で v の絶対値が急激に変化しているところを示す。

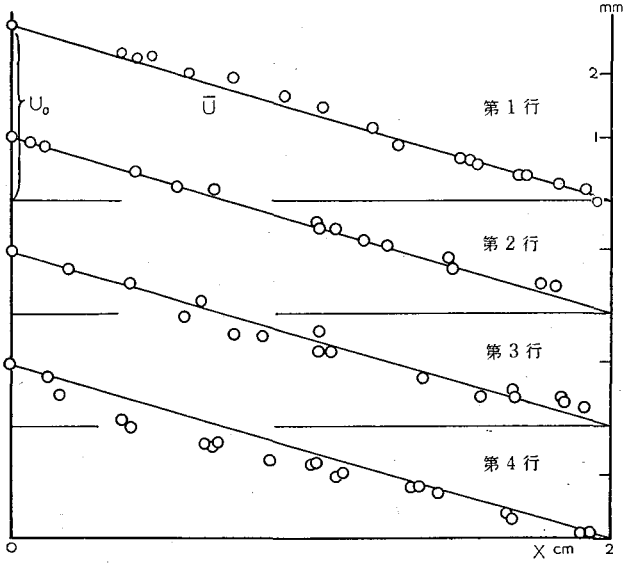
0.35～0.4 のしまりゆきでは，3～8 mm くらいの直径である。以上変形の大小によつて弱線の存在をみいだしたが，あとで示すように，弱線にそつて組織の点からみても氷の粒子のつながりかたが弱いのである。

今までは，各代表点の変位ベクトルの水平成分 u についてだけ考えて来たが，次に，垂直成分 v について調べてみよう。薄片が一様に圧縮されたとすれば，v は x 軸（薄片を 2 等分する圧縮方向の線）に関して対称になるはずである。しかし事実は第 4 図に示したように，v の分布は x 軸に関して非対称である。この図の v は荷重後 3 日のものであるが，圧縮の最初におこる変形を調べるために，荷重後 1 日目に起つた垂直成分 v_I を求めてみた。薄片の全面は，v_I が正（上向き）の領域と負（下向き）の領域とにわけられる。v_I が正から負に移る境界線すなわち $v=0$ の線を，薄片 12 については第 8 図に，薄片 14 については第 9 図にそれぞれ破線で示し，$v=0$ の線で境された領域ごとに，v が正か負かを，⊕印，⊖印で示してある。さきにのべたように，これらの図の実線は，組織の弱線である。組織の変化が一様におこるとすれば図の上半分が v_I の正の領域，下半分が v_I の負の領域になるはずであるが，事実は，そうではないのである。また，第 9 図の鎖線は，その左右で，v_I の値は正または負のままであるが，その絶対値が不連続的に，急激に増大，または減少しているところである。$v=0$ の線と弱線とのあいだには必ずしも密接な関係はみられない。しかし，$v=0$ の線には，基本領域の中央を，基本領域を両断するように走る傾向がみられる。$v=0$ の線が鉛直方向に走るところでは，だいたいにおいて，$\frac{\partial v}{\partial x}$ が大きいところである。$\frac{\partial v}{\partial x}$ の大きいことは，剪断歪の大きいことを意味する（剪断歪は $\gamma_{xy}=\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}$ で与えられ，$\frac{\partial v}{\partial x}$ のみで γ_{xy} が定められるわけではないが，おおよそのところ，$\frac{\partial v}{\partial x}$ が大きければ γ_{xy} も大きいと考えてよいであろう）。また，$v=0$ の線が水平に走るところは $\frac{\partial v}{\partial y}$ の大きいところであり，鉛直方向の圧縮歪の大きいことを表わしている。以上のことから，基本領域内では，その周辺部でよりも，中央部において変形が大きいと推定される。

本節（第 III 節）のはじめに，氷の結晶粒子内および結晶粒子境界にみられる変形についてのべたが基本領域内でおこるのは，粒界移動，底面辷りなどで，粒界辷りは，あまり目立たない。弱線部分では，他の粒子変形はもちろん，粒界すべりもみられる。

(3) かたしまりゆきの変形

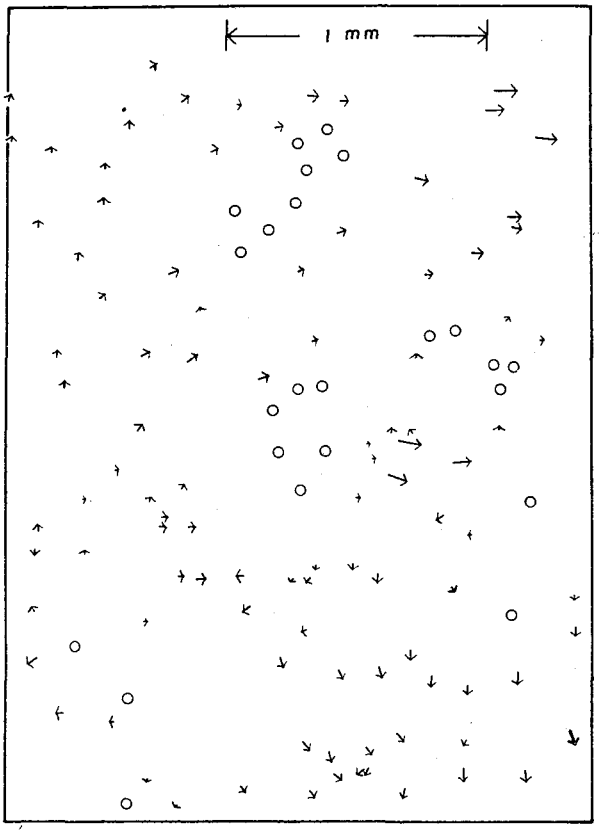
今までは，密度 0.3～0.4 の普通のしまりゆきについてのべたのであつた。そして弱線の存在を知つたが，密度が 0.42 以上のよくしまつた「かたしまりゆき」になると，はつきりした弱線はみられなくなる。組織内に強度の相対的な大小はあるが，密度が大きくなるにつれて，平均強度にくらべて平均強度からの偏差が小さくなり，特に目立つ弱い部分がなくなるのである。しかし，氷粒子の大きさが揃うというわけではない。粒子間の連結が強くなるのである。このことは，密度 0.49 のかたしまり雪の薄片の写真，図版 III-10 によく表われている。この写真は，中谷教授がグリンランドから持ち帰られた雪の薄片である。除雪機で吹きとばされた雪が



第10図　密度が0.49のかたしまり雪のu—x図。第6，7図に示したふつうのしまり雪のu—x図とは異なり，uの変化に急激な不連続がなく，比較的滑らかである。

堆積したのちかたまつた雪で，弱線のないかたしまりゆきの例としてここに示した。

このようなかたしまりゆきにおいては，組織の強さが平均化しているため，力を加えた場合，内部歪が比較的一様におこる。その例を第10図に示した。この図は，第6，7図と全く同様に，代表点の変位の水平成分uをx座標に対して表わしたものである。前の第6，7図においては，変位が弱線のところで不連続的に変つたのに反し，この図では，uの値が平均変



第11図　かたしまり雪（薄片5，密度0.48）を圧縮した場合の組織の一部の相対変位を示す。図の中央附近を基準としたときの組織の各点の相対変位を矢印で表わしてある。白丸印は変位がなかつた点である。かたしまり雪でも，内部歪が非常に不均一におこつていることがわかる。

位線に近く連続的に変化している。このように，かたしまりゆきには，はつきりした弱線が存在しないために，上の(2)で述べたような，組織の変化形式はほとんどおこらない。ただし，かたしまりゆきの内部歪が一様であるといつても，それは，弱線が存在するふつうのしまりゆきと比較してのはなしである。実際にその組織に生じた変形を，拡大した顕微鏡写真上で調べてみるとかなり複雑である。薄片5 (密度；0.48) を圧縮した場合の組織の一部の相対変位を第11図に示した。図の中央附近を基準としたときの組織の各点の相対変位を矢印で表わしてある。白丸印は変位がなかつた点である。これを見ると，かたしまりゆきでも，内部歪が非常に不均一におこつていることがわかる。

かたしまりゆきの氷の粒子における変化の形式は，しまりゆきの基本領域内におけるものによく似ている。すなわち，変化の形式の主なものは，底面辷り，粒界移動，細胞化などである。

IV. 積雪組織の弱線および基本領域の強さ

前節では，積雪の薄片に一様な圧縮応力をかけて，弱線となづけた線に沿つて特に大きな変形のおこることをみた。このばあい，応力は一様であつたのだから，弱線は，積雪の薄片の組織にもとからそなわつていたものにちがいない。したがつて，力をかけて圧縮しなくても，氷粒子の配列，連結の上に，弱線のところでは，なにか特異な点がみいだされるはずである。薄片の写真からわかるように，積雪の組織は，氷の粒子がその両端でつながりあつた網目構造である。氷の粒の網目は，たくさんの単結晶領域にわかれていて，その結晶の境界は，粒子間の最も細くなつている連結部を横切つていることが多い。今後，粒子間の最も細くくびれた部分を，そこに粒界が存在しているという意味で，単に「**粒界**」とよぶことにする。粒子は粒界のところで最も細くなつているので，粒子の強さは，この粒界のところの太さできまる。それで今後単に「粒界の太さ」というときは，粒界のところの粒子の直径をさすことにする。粒子の細いところ，あるいは粒子の密度の小さいところでは，積雪の組織は弱いにちがいない。弱線を渡つて両側の基本領域をつないでいる氷の橋にある粒界の数を弱線の単位長さについて n，粒界の太さを d としたとき，その弱線の強さは

$$S = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^{n} d_i^2$$

の大小によつてきまるであろう。簡単のため，この S そのものを**弱線の強さ**とよぶことにする。S の値は，圧縮の実験によつて定めた弱線の位置を積雪薄片の写真上に書きうつし，その写真の上で弱線を横切る氷の橋の粒界をしらべれば求められる。

基本領域は弱線と異なつて，平面的な拡がりをもつ領域であるが，その強さは，ここに定義した弱線の強さと比較しうるように定義しなければならない。

基本領域の組織は比較的均一であるが，勿論一様ではない。薄片の写真について粒子間の連結の状態を調べると，強固に連結した部分もあれば，比較的連結の悪い部分もある。そして，事実，連結の悪い部分をつぎつぎにたどつてゆくと，ひとつの曲線がえられる。連結

の悪いところは弱いにちがいないから，これは基本領域の中での弱線ともいうべきものである。それらの線に沿つて，上に述べた弱線の強さの式をそのまま適用して，それらの線の強さ S を求める。それらのうち，最も小さい値の S に対応する線の強さで，その基本領域の強さがきまるものと考え，その S の値で，**基本領域の強さ**を表わすことにする。このように定義すれば，弱線の強さと基本領域の強さを比較することが可能である。

第1表 薄片 12，14 の基本領域，弱線について組織の強度 S，粒界の数，粒界の平均の太さの比較

		組織の強度 S (cm²/cm)	粒界の数 (本/cm)	粒界の平均の太さ (mm)
薄片12	基本領域	4.8×10^{-3}	14.3	0.211
	〃	4.3	10.3	0.224
	〃	5.0	15.2	0.227
	弱線	2.2	7.2	0.204
	〃	2.6	9.0	0.223
薄片14	基本領域	13.8	14.6	0.348
	〃	7.6	14.0	0.262
	〃	9.5	15.1	0.282
	弱線	3.2	8.1	0.226
	〃	3.6	6.4	0.267
	〃	4.5	8.1	0.266
	〃	4.3	7.5	0.267

薄片 12 および 14 について，代表的な弱線の強さ，基本領域の強さを求めた結果を第1表第2列に示した。これらの値を比較してみると，基本領域の強さは弱線の強さの 2～3 倍になつていることがわかる。つまり，弱線の強さは基本領域内の最も弱い線の強さの 1/2～1/3 にしか達しない。このような強さの違いが，第3節で述べたような，内部歪の不均一の原因なのである。第1表には，今調べた弱線および基本領域内での弱線にそつて，単位長さ当りに存在する粒界の数（第3列），およびそれらの粒界の平均の太さ（第4列）も示した。弱線に存在する粒界の数は，基本領域の最弱線に存在する粒界の約 1/2 にすぎない。しかし，粒界の平均の太さは，弱線部分でも，基本領域内でもかわらない。薄片 12 においては，ほぼ同じ太さであり，薄片 14 においては，弱線の方がむしろ太い場合もある。それゆえ，弱線の機械的強度が小さいのは，そこにある粒界の太さによるのではなく，数が少ないことによるのである。

V. 積雪組織の不均一性について

前節までに何度も述べて来たように，積雪組織は，粒子同士が比較的良く連結している領域（基本領域）が，弱線という連結の悪い線状の部分によつてかこまれている一種の団塊状組織である。このような粒子の空間的な集合状態の不均一性は，積雪だけがもつ特有の性質なのであろうか。

積雪は，小さな粒状あるいは柱状の氷が連結した氷粒子の集合体であつて，一種の粉体と考えることができる。積雪組織に見られる，粒子の空間的に不均一な集合状態は，積雪のみに特有なものではなく，粉体一般に共通な状態であつて，粉体物理学における多くの実験でも確

かめられた事実である。たとえば，直径が1 mm程度の球形の金属粒子を二次元的に配列させると，いたるころに粒子同士の接触の悪い部分，すなわち，空隙あるいは充填の不連続部分を生ずる。この空隙あるいは不連続部分を，非接触空間，または橋渡し空間といつている[3]。この，粉体の一般的性質を，積雪の粒子の充填に関して考えてみよう。

粉体の物理的性質を表わす基本量の1つに空隙率（又は多孔度）がある。空隙率 p は

$$p=(1-\rho_a/\rho)\times 100\%$$

で定義される量である。ここに，ρ_a は粉体の見掛けの密度，ρ は真の密度，すなわち，粉体をつくつている物質それ自体の密度である。第12図の実線は，いろいろな密度の堆積氷（積雪，フイルン，氷河氷など）の空隙率を示す。ここに氷の密度は0.917として計算した。空隙率は，粒子の大きさ，形，粒子の大きさが揃つているかいないかによつて変るのは勿論であるが，粒子の集合（充填）の形式すなわち，一様に充填されているか，あるいは橋わたし空間があるかなど，によつても大きく変化する。

一様な大きさの球を規則的な方式に従つて充填した場合の空隙率は理論的に求められる。たとえば，単純立方格子型充填（配位数 $n=6$）では $p=47.6\%$，単純立方格子型充填（$n=8$）では $p=39.5\%$，斜方格子型（$n=10$）では $p=30.2\%$，最密充填（$n=12$）では $p=26\%$ である。また，大小の粒子が混合している場合は $p=15\%$ まで減少しうることが知られている。実際には，これらのうちのどれになるかというのに，Manegold[4] 等が散弾の実験で示したように，散弾は最密充填にはならず，平均して配位数 $n=8$，空隙率39.5%くらいの充填になる。同じ大きさの球の，非接解空間がない空填形式のうちで最も疎な充填形式は，上に述べた単純立方格子型である。その空隙率47.6%を p_t で表わそう。すると同一の球を充填した場合，橋渡し空間がないかぎりは，充填形式の如何を問はず，そのときの p と単純立方格子の空隙率 p_t との比 $p_t/p=e$ は $e\geq 1$ でなくてはならない。もし，$e<1$ になることがあれば，橋渡し空間があることになる。しかし，$e>1$ であるからといつて，橋渡し空間がないとは必ずしもいえない。同じ大きさの金属球についてのManegoldの結果は $p=39.5\%$ で，$e=1.2$ となり，e はたしかに1よりは大きい。しかし，球形ではないが，一定の形状，粒度をもつた金属粒子を実際に充填させると $e>1$ になることはなく，一般には $e<1$ になる（多くの場合 $e=0.55\sim 0.7$）。不規則な粒子の場合，e の値はとくに小さい。

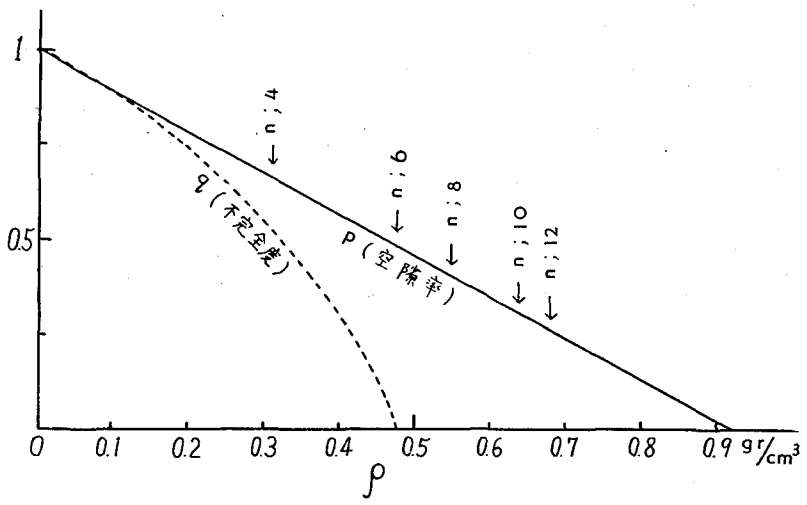
球状でない粒子の充填のばあいにも $e=p_t/p$ が1より大きいか小さいかによつて橋渡し空間の存否を推定することにはもちろん問題はある。しかし，そのようにしても，だいたいは正しいのではあるまいか。このように考えると，微粒子からなる粉体の集合状態が，一般にかなり疎な充填であつて，いたるところに空隙（非接触部分，橋渡し空間）が存在していることを示している。粉体物理学では空隙の多寡，すなわち，充填の不完全性を示す度合として，$(1-e)$ がしばしば用いられる。さらには，空隙率100%，すなわち，$p=1$ の場合の $(1-e)$ の最大値0.525を単位に選び，

$$q=(1-e)/0.525$$

とし，この q によつて充填の不完全度を表わす。q が正ならば必ず橋渡し空間が存在するわけである。

氷粒子の大きさが比較的均一な積雪について，この充填不完全度 q を求めてみよう。q は

$$q=(1-e)/0.525=(1-p_t/p)/0.525=\left\{1-\left(\frac{p_t}{1-\frac{\rho_{snow}}{\rho_{ice}}}\right)\right\}\Big/0.525$$



第12図 いろいろな密度の堆積氷の空隙率 p，単純立方型充填を基準としたときの充填の不完全度 q を示す。その密度の堆積氷に対応する理想的な場合の配位数を n で示してある。

となる。$\rho_{ice}=0.917$ として，上式によりいろいろな密度の雪について q を求めたのが第2表である。q は，また，第12図に点線で示してある。

q が0，すなわち単純立方型充填になるのは，積雪では，その密度が0.48のときである。また，上にのべたManegold らの実験によると球形粒子は平均して配位数8，空隙率 39.5% の充填になるが，これを積雪について考えると，その時の積雪の密度は0.55となる。同じ大きさの球の最密充填の場合の空隙

第2表 いろいろな密度の積雪の空隙率 p および充填の不完全度 $(1-e)$，q.

ρ_{snow}	p %	$(1-e)$	q
	100	+0.525	+1.00
0.10	89	+0.47	+0.89
0.20	78	+0.39	+0.745
0.30	67	+0.29	+0.56
0.33	64	+0.255	+0.49
0.38	58.5	+0.185	+0.355
0.40	56	+0.16	+0.30
0.42	54	+0.13	+0.25
0.48	48	0	0
0.55	40	−0.19	−0.36
0.60	35	−0.38	−0.72
0.68	26	−0.84	−1.60

率は26%であるが，これに相当する積雪の密度は0.68である。

ふつうのしまりゆきでは密度が0.3～0.4であるから，不完全度qは+0.6～+0.3である。密度が0.2以下のやわらかい雪では，qは+0.75以上である。このように積雪の充填は非常に悪いのであつて，橋渡し空間が相当広く分布していることを想像するに難しくない。このような充填の不完全度qを基準にして，積雪の分類をすることも考えられる。たとえば，球の最密充填に対応する積雪の密度0.68を基準にして，密度0.68以上は積雪といわず，氷と考える。また，不完全度が0となる密度0.48以上の密度の積雪を「密かたしまりゆき」，不完全度が0～0.25，すなわち密度が0.42～0.48の積雪を「かたしまりゆき」，不完全度が0.25～0.5，すなわち密度が0.33～0.41の積雪を「しまりゆき」，不完全度が0.75以上のもの，すなわち密度が0.2下の積雪を「しんせつ」というように分類する試みである。この分類は，一様な球形粒子が集合したときの単純立方格子型の理論値を基礎にしているので，実際の積雪の集合状態とかなりかけはなれている懸念はあるが，一応の目安となると思われる。

大小さまざまの粒子が混合している場合には，充填は一般に密になる。中谷[5]は，除雪機械でふき散らされた雪が再び堆積した雪について実験しているが，このばあいは，大小さまざまな大きさの粒子が混合した結果として非常に密に充填した雪ができた。図版III–10は，この雪の薄片で，今のべたように，いろいろな大きさの粒子が混合している状態がよくわかる。

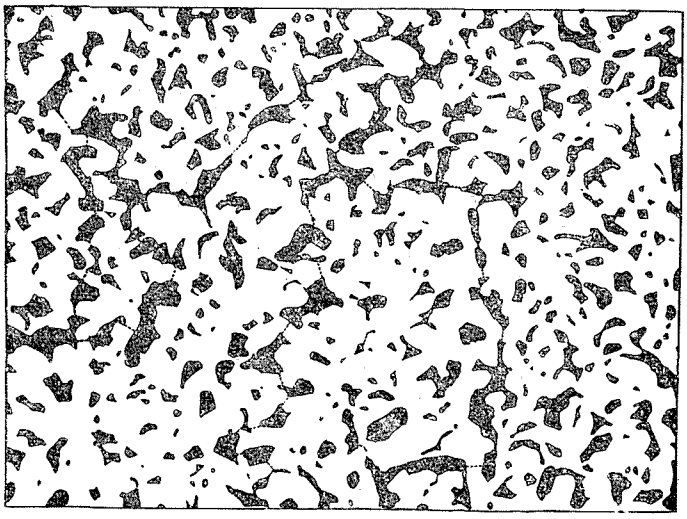
VI. 積雪組織の弱線帯

(1) 薄片の氷粒子の連結状態にみられる弱線（弱線帯）

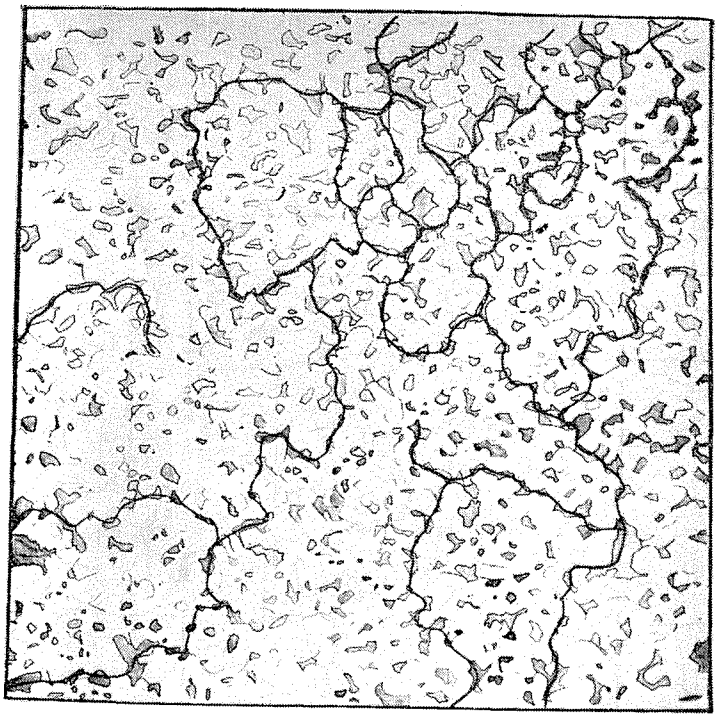
再び図版IIに示した薄片12の組織に注目してみよう。この薄片は厚さが0.7 mmあり，上下の組織がかなり重なり合つているが，薄片の上面から下面までの間に，氷が全くない部分もいたるところにある。このような空隙部分を黒くそめ，それ以外の，氷が存在する部分を白く残したのが第13図である。面積の大きい空隙部分のある所では，組織の強度が小さいことは当然予想される。そして，実際に，このような面積の大きい空隙部分は弱線にそつて配列されているのである。第13図の点線は第8図に示した弱線の一部で，弱線の他の部分は黒くそめた空隙部分を走つている。これによつて，圧縮による変形から定めた弱線が，積雪の氷粒子の組織の幾何学的形態と全く一致していることがわかる。

第14図は，薄片14（密度0.386）の組織の概略と弱線とである。このばあいにも大きな空隙部分は，弱線にそつて分布している。このような弱線部分が，前に述べた粉体における非接触領域（橋渡し空間）に相当する。

積雪組織の各部の強度を表わすのに，前には，ある曲線を渡す氷の橋の粒界の数と太さとをつかつた。ここで，別のやりかたとして，薄片の単位面積内にある空隙部分の広さを強度の目安として用いてみよう。空隙部分が広ければ強度は小さいであろう。そのためには幅のない弱線についてもある「広さ」を考える必要がある。上に述べたように，弱線に沿つては大きな空隙が並んでいるので，その大きな空隙を含むような幅を弱線にあたえこの幅のある弱線部分

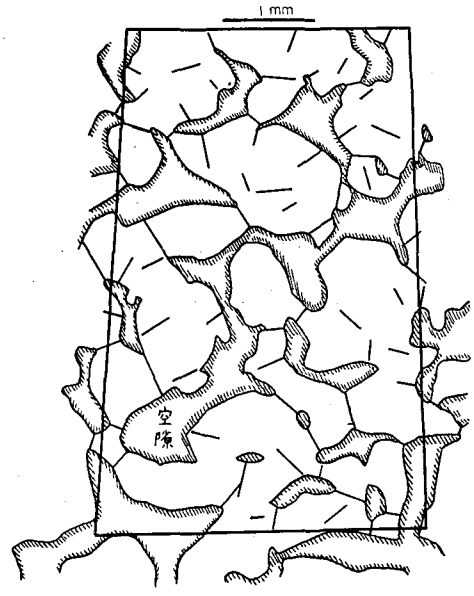


第13図　薄片 12 (厚さ 0.7 mm) の，薄片の上面から下面までの間に氷が全くない空隙部分を黒くそめ，それ以外の氷が存在する部分を白く残した。点線は弱線を示す。面積の大きい空隙部分は弱線にそつて配列されていることがわかる。

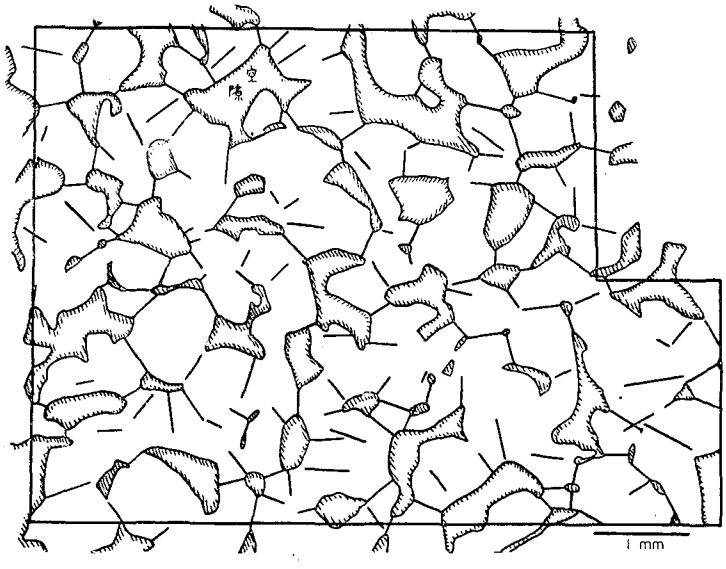


第14図　薄片 14 (密度 0.386) の組織の概略と弱線 (実線で示してある)。

を「**弱線帯**」とよぶことにしよう。1例として第15図に薄片12の1つの弱線帯の模型図を示した。斜線をほどこした内側の部分が空隙の部分，それ以外の白いところが氷の部分である。この図の白い部分に示した多数の短い実線は，氷の粒子のなかの単結晶の境界(粒界)である。前にのべたように，結晶の境界の長さは(薄片の面に投影された長さ)，粒子の強さを決定する。上下に重なつた組織の粒界も同一平面上に描いたので粒界を示す線が錯そうしている。しかし，今は空隙と氷の部分との広さの関係だけをみるのでこの結晶粒界を示す線は考えない。第16図には，同じ薄片の1つの基本領域の模型図を示した。第3表の第2列は観察した基本領域，あるいは弱線帯の面積，第3列はそのうちで空隙がしめる面積，第4列は，第2列の面積に対する空隙面積の比である。空隙は互に連結していないので，面積計で1つ1つの空隙部分の面積を求め，それらを加えて空隙の全面積とするのでは，あまりに手がかかりまちがいをおこしや



第15図 薄片12の1つの弱線帯の模型図。斜線をほどこした内側が空隙の部分，それ以外の白いところが氷の部分である。氷の部分に示した多数の短い実線は，粒子間を連結する結晶粒界である（上下に重なつた組織の粒界も同一平面上に描いたので，粒界を示す線が錯綜している)。



第16図 薄片12の1つの基本領域の模型図

すい。それで第VIII節でのべるようにして標準面積と比較してひとつひとつの空隙の面積を定め，求めたものの総和を第3列の値とした。誤差が大きいのではないかと懸念されるが，実際にはかなり正確である。同じ方法で氷の占める部分だけの面積を求め空隙部分の面積の和を求めると，その和と全面積（第3表の第2列の値）との差は1%以下である。第3表第4列に示されているように，力をうけた場合，変形することが少ない基本領域では25%程度の空隙率であるのに対して，弱線帯の空隙率は約31%で，弱線帯の方が基本領域よりも空隙率が約6%高い。6%というと，わづかの差異のように思われるが，さきにのべた粒子の充填の不完全性ということを考えると6%の差がそんなに小さな差ではないことがわかる。ここでのべている空隙率は，前に用いた空隙率とは意味が違うので，直接比較することはできないが，ひとつの目安として空隙率のちがいによる粒子の充填の不完全度の差異を求めてみよう。第2表によると，密度が0.33～0.41のふつうのしまり雪の空隙率が6%大きくなると，粒子の充填の不完全度が約15%増大する。この分だけ組織の中に非接触空間ができて，粒子間の連結がわるくなるのである。こう考えると空隙率が6%違うというのはかなり大きな差である。このように基本領域の方が弱線帯よりも粒子が密に分布していて，空隙が少ないことがわかつた。

第3表 薄片12の代表的な基本領域と弱線帯についての空隙の面積の比較

領域		全面積 $\times 10^{-3}$ cm^2	空隙の面積 $\times 10^{-3}$ cm^2	空隙の面積の百分率%
基本領域	A	244	62	25.3
	B	267	67	25.2
弱線帯	C	135	42	31.5
	D	385	116	30.4

今，例にあげた薄片12と14は，密度が0.38で，単純立方格子型の充填を基準とした充填の不完全度が0.34の積雪である。不完全度が0，すなわち密度が0.48以上の積雪では，空隙の大きさや分布がどうなつているであろうか。図版III-10に示した薄片25は，密度が0.49の積雪であり，充填の不完全度は0である。この薄片の厚さは，薄片12や14と同じ0.7 mmであるが，図版III-10を見ても，弱線に相当する部分が見当らない。これは，この薄片全体が1つの大きな基本領域であることを意味している。

(2) 基本領域および弱線帯での粒子の数，粒界の数の差

弱線帯における空隙率が基本領域の空隙率より大きいことを上に述べたが，次に，弱線帯における粒子数，粒界の数，太さなどがどういう傾向をもつかを考えてみよう。さきに，弱線について，また基本領域内の弱線ともいうべき線について，それらをまたぐ氷の橋の数や太さを考えた。実は試料として使つている薄片には厚さがあるが，その時は，この厚さを無視し，組織全体を平面に投影してみたのであつた。しかし，実際には，薄片の厚さは0.6～0.7 mmもあり，組織はある程度重なりあつている。それで，その厚さを利用して，弱線帯と基本部分との粒子の数や粒界の数を立体的に求めようとするわけである。

氷は透明なので，組織が互に重なり合つていても，手前の粒子を通して，向うがわにある粒子の粒界もだいたいみることができ，その数だけなら割合容易に数えられる。また，薄片面に

垂直な方向を向く粒界の存在も，顕微鏡写真上で比較的容易に判別ができ，その太さも判定できる。

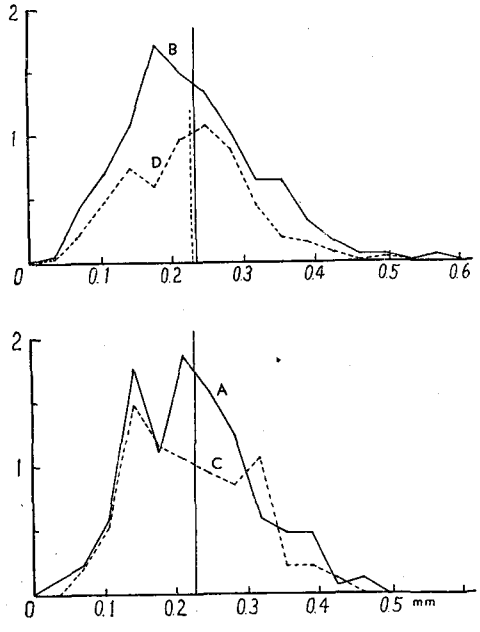
第4表第2列に，薄片試料12について求めた単位体積当りに含まれる粒子の数を示した。これによると，基本領域は，弱線帯よりも約4割多くの粒子を含んでいることがわかる。次に単位体積当りに換算した粒界の数を表の第3列に示す。粒界の数もまた，弱線帯にくらべると基本領域の方が3割以上も多い。粒子の数も，また，粒子間を連結する粒界の数も多いということは，その領域の組織が稠密であつて，機械的強度が大きいことを示す。このように立

第4表 薄片12の代表的な基本領域と弱線帯について，組織の強さに関係のあるいろいろな量の比較

領域		粒子個数 個/cm³	粒界の数 個/cm³	粒子の会合数	粒界の平均の太さ mm	最弱線に沿つた氷の橋の数 本/cm	最弱線に沿つた氷の橋の最小断面積の和 ×10⁻³ cm²/cm
基本領域	A	5900	10200	3.5	0.224	10.3	4.3
	B	6700	9780	2.9	0.227	15.2	5.0
弱線帯	C	4630	7710	3.3	0.224	3.8	0.9
	D	4110	5970	2.9	0.223	9.0	2.6

体的に考えても，弱線部分の組織は基本領域よりもかなり粗であることがわかつたわけである。

氷の粒子はつらなりあつて立体的な網を作つているが，網の結び目のところでいくつの氷の粒子が会合しているかをしらべてみると（表の第4列），基本領域と弱線帯とであまり大きな差がない。また，これらの領域について，粒界の太さの分布を求めてみると第17図のようになる。これから，粒界の平均の太さを求めてみると（表の第5列），これも基本領域と弱線帯とでほとんど差がない。すなわち，基本領域においても，弱線帯においても，同じ太さの粒子が大体同じ数だけ連結しあつているのである。粒子の連結状態が全く同一であり，しかも基本領域の方が弱線帯よりも機械的に強いということは，粒子の長さが基本領域では短かく，弱線帯では長いことによつて説明されるであろう。その結果，当然，基本領域では組織が密に，弱線



第17図 第4表にあげたのと同じ領域について求めた。粒界の太さの頻度分布。実線が基本領域，破線が弱線帯の分布で，それぞれの平均も示してある。

帯では粗になるはずで，前にのべた結果と一致する。

VII. 積雪組織の微細な変化について

積雪の組織は，機械的に強い基本領域が，機械的に弱い弱線によつて囲まれているような不均一な組織であることを今までにのべたが，これは，積雪組織の幾何学的形態である。このような幾何学的形態が圧縮によつて変化をうけるときには，組織をつくつている氷の粒子自身に物理的な変化がおこるはずであり，それについては，第III節のはじめに簡単に紹介をしておいた。この節では，そのような氷の粒子自体におこる物理的変化を考えることにする。

(1) 底面辷り

積雪は小さな単結晶氷が連結している集合体であるから，単結晶氷の変形に関する実験事実が積雪の変形に関する基礎となる。氷は，結晶学的には六方晶系の D_{6h}^4 に属すると一般には考えられているが，Шумский[6] をはじめとして氷は三方晶系の C_{3v} に属するとする人もかなり多い。そのいずれであるにせよ，氷は，主軸である六回軸，あるいは三回軸に垂直な底面 (0001) で辷つて塑性変形を行いうる。このことは，古くからいろいろな研究者によつて調べられ，最近でも，中谷[7]，若浜[8] らによつて，大きな単結晶氷について行なわれた実験で示された。

積雪とくに密度が大きなかたしまりゆきの薄片を圧縮すると，その組織の中に図版 IV-11, 12 に矢印で示したような粒子の変形が見られる。これは粒子を作つている氷の単結晶の底面に沿つた相対的な並進運動，すなわち底面辷りである。このように大きな底面辷りが見られるのは比較的に稀ではあるが，図版 I-4 に示したような真直ぐな平行線として現われる小さな底面すべりは多くの粒子に見られる。これらの平行線が底面辷りによる辷り線であるならば，結晶の主軸はこれらの平行線に垂直な面内になければならないが，次に示す通り実際にそのようになつている。

薄片試料を偏光顕微鏡の載物台にのせ，直交ニコルの下で載物台を回転させると，各粒子は一般に 90° ごとに消光するが，その消光は結晶の主軸方向が，偏光顕微鏡の偏光子又は検光子の主要面内に位置したときにおこる。そして，上記のような平行線を示す粒子では，すべてのばあい，消光は平行線が偏光顕微鏡の偏光子又は検光子の主要面と平行になつたときにおこつた。なお，図版 IV-12 に矢印で示したような粒子の変形が底面辷りであることは外観だからでも判断しうるが，これについても，今のべた方法で，これが底面辷りであることを確かめた。

図版 IV-12 のような著しい底面すべりは稀な現象であるが，図版 I-4 のような平行線として現われる底面辷りは，密度の大きい，弱線のないかたしまりゆきに 500 gr-wt/cm² 以上の比較的大きな力を加えた場合，多くの粒子に顕著に現われる。密度 0.3～0.4 のふつうのしまりゆきの薄片では，200～300 gr-wt/cm² の程度をこえる力を薄片を破壊させずに加えることは困難である。そして，200～300 gr-wt/cm² の力を加えた場合には，著しい底面すべりがみられないことはもちろん，図版 I-4 に示したような明瞭な辷り帯を生ずる粒子の数も，薄片全体の粒子

の数に比べるとごく少ない。薄片12ににおいては，図版IV-13に矢印で示した粒子に，圧縮後，同図14に矢で印したような不明瞭な辷り線が観察されたにすぎない。しかし，次の第2項，第3項でのべる粒界辷り，粒界剝離，また少数ではあるが，粒界移動，粒子の細胞化が弱線部分にある氷粒子に認められる。

一般に結晶の塑性変形は主として辷りと機械的双晶形成とによつておこることが知られている。ことに，辷りは一般的である。辷りの存在は結晶の表面に現われる辷り線によつてみとめられるが，まえまえからしられていた肉眼的あるいは顕微鏡的辷り線以外にも位相差顕微鏡ではじめて検出できるような微細な辷り線の存在することが今日では知られている[9]。微細辷りは，主として金属結晶について研究されたものであるが，氷の結晶においてもおこりうるものと考えてよいであろう。

密度0.3～0.4の普通のしまり雪の薄片の粒子には顕微鏡的なすべり線はあまりみられないのであるが，まえにのべたとおり，基本領域もたしかに軽くではあるが塑性変形をおこしているのであるから，そのなかの粒子もまた塑性変形をうけたにちがいない。ただ，その塑性変形が軽微であるため，微細な辷りだけしかおこらず，顕微鏡でみうるような辷り線は現われなかつたのであろう。実際，倍率を高め，収束光をつかつたり，あるいは光を斜めにあてたりして注意深く観察すると，今までにのべてきた低倍率の顕微鏡観察（通常，対物レンズとして$2\frac{1}{2}$倍または5倍を使用，15～25倍の拡大率で写真を焼付けた）ではみられなかつた細かい辷り線をみいだすことができる場合がある。その例を図版IV-15，16に示す。左の写真15は，普通の照明で，ただ10倍の対物レンズを用いて倍率を45倍に高めたばあいであるが，中央の粒子Aに，鉛直線に対して少し傾いて左上から右下に向つて連る平行線がかすかに見える。低倍率の観察では，このような微細な変化はみすごされてしまう。右の写真15は，14と同じ倍率で，光を斜めにあててとつたものである。14ではかすかに見えていた微細な辷り線の平行線群が非常にはつきりとみえる。

変形をうけた氷の結晶には，図版I-4，IV-12の矢印をつけた辷り線のように，結晶粒の2～3カ所だけで選択的に大きな辷りをおこし（粗大辷り），それら辷り線の間にはほとんど辷り線が見られない場合と，今上でのべた図版IV-16の粒子Aに現われた辷り線のように，粒子の全表面にわたつてほぼ一様な間隔で密にならんだ辷り線が現われる場合とがある（微細な辷り）。60～70倍に拡大した顕微鏡写真について，あいとなる2本の辷り線の間隔を測定してみると，粗大辷りのばあいには，ほとんどが75～160μの範囲にあり，微細な辷りでは7～18μであつた。これらの値は，氷の結晶主軸が写真の面内にある場合，すなわち，結晶の底面が写真に垂直に交わつている粒子について求めたものなので，あいとなる辷り面の実際の間隔を示している。著者[10]が，ふつうの多結晶氷を圧縮した場合に，氷の表面に密に現われた微細な辷り線の間隔を測定した結果でも，10～20μていどであつた。樋口[11]は，氷の表面に作つた熱腐蝕孔の底に，階段状の構造を見出し，その段の高さが3～16μであることを示した。これは，筆者が測定した微細な辷り線の間隔7～18μとほとんど一致している。一方，中谷[7]が角棒状

の大きな単結晶氷を曲げたときに観察した，結晶の底面に平行な多数の平行線の間隔は60μであつた。中谷は，このことから氷の結晶は厚さ60μの単元層が積み重なつた層状構造であると考えた。筆者が積雪の粒子あるいはふつうの氷について得た微細な辷り線の間隔は，上にのべたように10μていどであつて，中谷の得た60μよりかなりせまい。このちがいは，測定に用いた光学系の分解能の相違によるものと考えられる。中谷が辷り線の間隔の測定に用いた写真は，倍率が数倍ていどの影写真であり，筆者の用いた写真は拡大率が60～70倍の顕微鏡写真であつた。金属結晶の辷り線の間隔も，光学顕微鏡を用いて研究していた時代には数μていどだと考えていたのが，その後，分解能の大きい電子顕微鏡を用いて観測した結果，微細な辷り線の間隔は数百Åていどであることがわかつてきた。氷においても，さらに分解能のよい光学系を用いて観察すれば，辷り線の間隔としては，もつと小さな値が得られるのではないかと思われる。

(2) 粒界辷り

積雪の薄片圧縮実験において，上に述べた底面辷りとともに，積雪の変形に大きな役割を演じているのが，結晶粒界に沿つての辷りである。図版I-1, 2に，この粒界辷りの例を示した。このような粒界辷りは，密度の比較的小さい雪（しまりゆき）を塑性変形させた場合，弱線の粒界におこることが多い。したがつて，粒界辷りは，しまり雪の変形において重要な部分を占めているわけである（基本領域の粒子にも粒界辷りがおこることもあるが稀である）。なお，密度の大きな，弱線のない「かたしまりゆき」では，粒界辷りよりも底面辷りのほうが顕著におこる。

うえの圧縮実験でかたしまり雪にかけた力は500 gr-wt/cm²，しまり雪にかけた力は100～300 gr-wt/cm²で，しまり雪にかけた力の方が少し小さい。しかし，しまり雪の弱線を渡る氷粒子の数は少ないのであるから，氷粒子自体に生ずる応力としては，弱線の粒子での方がかたしまり雪の粒子でよりは大きいであろう。そして，粒界辷りはしまり雪の弱線にある粒子にみられるのである。したがつて粒界辷りがおこるためには底面辷りをおこさせるに必要な力よりも大きな力がいる。すなわち，粒界辷りは底面辷りよりおこりにくいと一応は考えられる。これは，金属結晶その他の結晶について一般的にいわれていることである。しかし，粒界辷りも底面辷りも，その面にそう剪断応力のためにおこるのであるから，粒界とそれをはさむ氷の粒子の底面との方向関係で，粒界辷りだけがおこつたり底面辷りだけがおこつたりすることになる。この関係をまとめると次のようになる。

(i) 粒子が細長いときには，底面辷りがおこりやすい。図版V-17の矢印をつけた粒子がその例である。密に並んだ辷り線がみえる。細長い粒子では，粒子内の応力が強いためにも辷りがおこりやすくなるが，また，辷りに対する妨害がすくないということも関係している。すなわち，細長い粒子では，辷り面で粒子を切断したとき，辷り面の端が粒子の自由な表面と一致するばあいが多いのである。辷りの面の端が自由なら，辷りは妨害をうけない。これに反し，太い粒子だと，辷り面の端がとなりの粒子との粒界でおわることが多くなり，辷りが妨げられ

る。実際，図版V-17の写真でも，たくさんの辷りはみなその周辺がすべて粒子の自由表面になるような面でおこつている

(ii) 粒子の結晶主軸が粒界に垂直にちかいと，すなわち結晶底面と粒界とが平行にちがいと，粒界辷りはおこらず底面辷りがおこりやすい。これは，底面辷りをおこすに要する剪断応力が粒界辷りをおこすに必要な剪断応力よりも小さいという一般的事実と一致する。すなわち粒界と底面とが平行にちかければ，両方にかかる剪断応力はほぼあいひとしく，辷りやすい底面辷りの方がおこるわけである。図版IV-12の矢印で示した底面辷り，また同IV-15の粒子A，Bにおける底面辷りがこの例である。

(iii) 粒界をはさむふたつの粒子の結晶主軸がともに粒界に平行，すなわち結晶底面が粒界と垂直にちかいときは，粒界辷りがみられることが多い。図版V-18のAの粒界辷りがその例である。このばあいには粒界にそう剪断応力は大きく，しかも粒子の結晶底面にそう剪断応力は小さいということがありうる。この粒界辷りはそのような事情のもとにおこつたのに相違ない。

(3) 局所破壊

密度が比較的小さいしまりゆきを圧縮すると，粒子間の連結が悪い弱線のところで集中的に変形がおこる。それで，弱線においては，圧縮歪が大きくなるとともに粒界での辷り，あるいは底面辷りがあまりにも進みすぎて，粒子間の結合が切れてしまうことがある。図版I-2に示した粒界辷りのうち，図の上方に見られる粒界Bではすでに粒子間の結合が切れている。また図版V-18にBと印した部分もその後まもなく切断した。このような粒子間の結合の切断は，積雪の組織のなかの局所におこつた破壊と考えてよい。連続した物体では，局所に小さな破壊がおこると，そこから破壊がまわりにつたわつて物体全体の破壊にみちびくが，積雪のばあいには，それが網目組織になつているため，局所の破壊は必ずしも周囲に伝わらなくてもすむ。事実，図版I-2，図版V-18の粒子間の切断は，まわりの粒子間の結合の切断を誘発してはいない。このように氷粒の切断は局所にとどまりうる破壊という意味で「**局所破壊**」とよぶことにする。

粒子間の破断には，底面辷りまたは粒界辷りが進行した結果としておこつたものとは別にもうひとつの種類がある。図版I-5，6あるいは図版V-19，20に矢印で示したような粒界における破断である。この種の破断は，粒界に引張り応力が生じた結果，粒界が剝離したものと考えられるので「**粒界剝離**」とよぶことにする。実際，つぎに示すように，図版I-5，6，図版V-19，20の粒界剝離がおこつたのは引張り応力の大きいところである。第8図の点線で表わされた弱線上に，A，Bの印があり，図版I-5，6，図版V-19，20の粒界剝離は，それぞれ，これらの点で起つたのであるが，これらの点のごく近くを，$v=0$の線が水平に走つている（vは粒子の変位ベクトルの垂直成分）。まえにのべた通り，$v=0$の線が水平になる所では，$\frac{\partial v}{\partial y}$が大きい。しかも，第8図のA，B点では$v$の値は，上に向つて，すなわち，$y$の正の方向に向つて負から正に変化しているので$\frac{\partial v}{\partial y}$は正であり，ここに大きな引張りが行われたことがわかる。

なお，若浜[10]は，大きな氷の結晶粒の粒界を利用して，粒界が実際に剝離しうることを示した。

局所破壊も粒界剝離も，近くの粒子に波及せずそれがおこつた粒子だけにとどまることもできるが，応力の強いときには波及することもある。このようなときには，破壊部分は次第に発達し，遂には巨視的な破壊に達するわけである。

(4) その他の組織の変化

以上のべて来た底面辷り，粒界辷り，内部破壊のほかに，力をうけた積雪組織に見られる変化として，粒界の移動，粒子の細胞化などがあるが，これらの現象は静荷重による圧縮実験よりはむしろ，定速度圧縮をうけた薄片に多く観察された。詳しいことは論文II[12]で述べることにし，ここではふれない。

VIII. 積雪の粘性と組織

前章までは微視的な立場に立つて，積雪の顕微鏡組織の圧縮による変化についてのべてきた。本節では巨視的な立場に立つて，積雪薄片全体の変形に注目し，薄片全体に関するクリープ，粘性と微視的な組織の変化との関係を調べる。

(1) 積雪薄片の粘性

第1図の装置によつて積雪の薄片を一定の静荷重で左右の方向に圧縮すると，薄片はクリープを起して次第にその長さを減ずる。薄片12，14のクリープ曲線を第18図に示した。横軸は静荷重をかけはじめてからの時間，たて軸は薄片の長さである。荷重後約50時間までは遷移クリープの期間でクリープ速度は次第にへつてゆくが，その後は定常クリープの段階となり圧縮速度は一定になる。圧縮の圧力（薄片を左右に圧縮する力，すなわち第1図のおもりWの目方を，薄片の左右の側面の面積で割つたもの）をP，薄片がΔt日間にうける縮みをΔxとすると，定常クリープに関する粘性係数ηは

$$\eta = -\frac{x_0}{\Delta x} P \cdot \Delta t$$

で与えられる。この式を用いて，薄片12，14の粘性係数ηを求めると

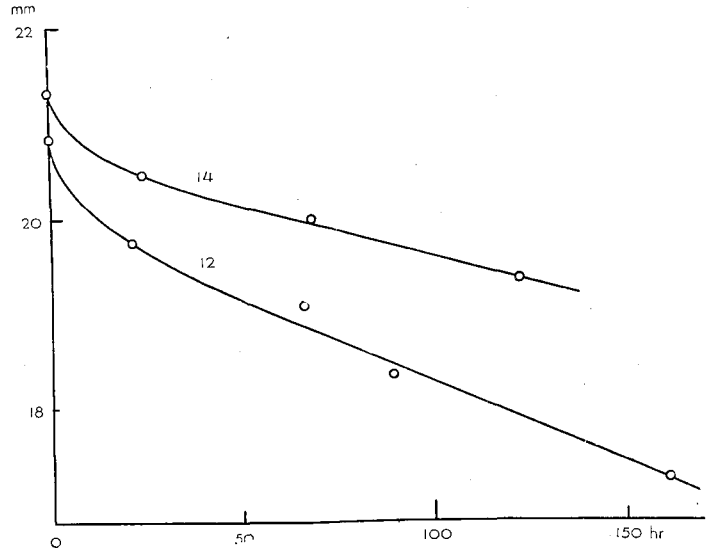
薄片12 (密度 0.381): $\eta = 5.5 \times 10^3$ gr-wt·day

薄片14 (密度 0.386): $\eta = 8.9 \times 10^3$ gr-wt·day

となる。

小島[13]は実際の積雪層の自然圧縮速度を測定して粘性係数ηと積雪の密度ρが$\log \eta = a + k\rho$の関係を保ちつつ変化することをみいだした。aは，温度，はじめに堆積した雪の結晶の種類でことなるが，kはそれらに無関係に一定である。第19図の$\log \eta - \rho$図で，小島が観測したすべての雪についての$\log \eta - \rho$曲線は互に平行で直線aとcの間にある。図の白丸印は上にあげた薄片12，14について得たηの値である。薄片12，14は荷重をかけてから120～150

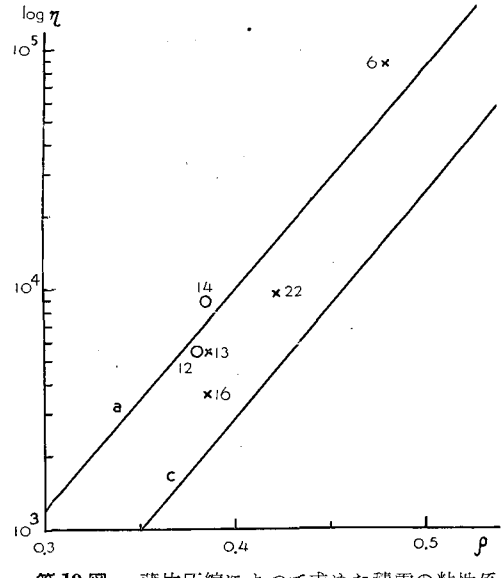
時間も連続的に圧縮したのでたしかに定常クリープに達していた。しかし，他のいくつかの薄片，たとえば薄片6，13，16，22などでは実験の都合や失敗のため15～25時間程度しか圧縮できず，遷移クリープしか観測しなかつた。そこでこれらの薄片については，クリープ曲線が薄片12，14のクリープ曲線と同じ形であると仮定して，得られた遷移クリープを外挿して定常クリープ速度を求め，それからηを求めた。それを図に×印で示してある。薄片の圧縮からえられた値は，ひとつをのぞいてはいずれも小島が与えた範囲，すなわち直線a，cのあいだにある。



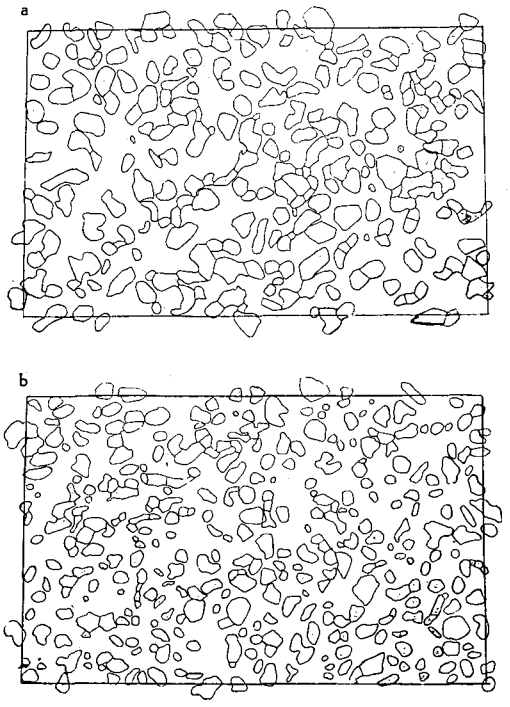
第18図　薄片12と14のクリープ曲線

(2) 積雪の粘性と粒度，組織の強度との関係

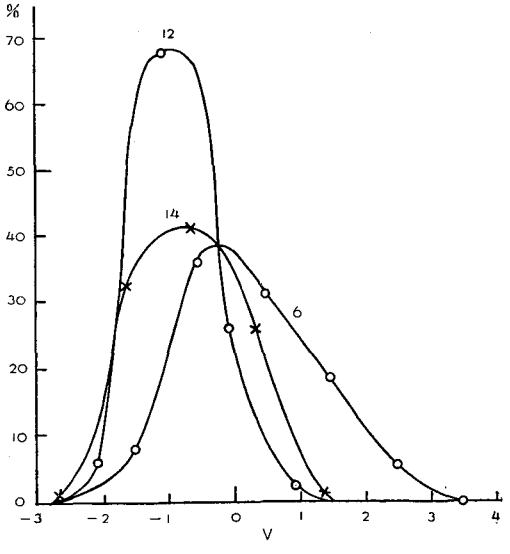
上の(1)でのべた薄片12と14は密度がほとんど同じであるのに粘性係数は6割以上も違つている。これは，密度が同じであつてもその組織が違うことに基因しているに違いない。第20図に，薄片12と14の一平面による切り口，すなわち，薄片の表面をなす，かんなで削られた氷粒子の切り口を示した。薄片12の粒子の方が，一般に薄片14の粒子の大きさよりも大きいことが一見してわかる。小島[13]は，同じ密度の「しまりゆき」と「しもざらめゆき」の粘性係数を比較して，「しまりゆき」よりも粒の大きさ，粒と粒との間隙が明らかに大きい「しもざらめゆき」の粘性係数の方が，「しまりゆき」の粘性係数よりもはるかに大きいことを見出した。粒子が大きくて組織が粗いざらめゆきの方が，外力に対



第19図　薄片圧縮によつて求めた積雪の粘性係数ηと密度との関係と，小島が積雪層の自然圧縮速度から求めた関係とを比較した（小島が得えた値はすべて，直線aとcの間に入つた）。



第20図 a；薄片12と，b；薄片14の粒子の切り口



第21図 薄片12，14および6の粒度分布を示す。粒度 V の単位はASTMできめられたもので，V が大きい程，粒度は小さい。

する粘性抵抗が大きくて圧縮され難いわけである。直観的には，組織の粗い「しもざらめゆき」の方が，固くしまつた「しまりゆき」よりも容易に圧縮されると考えられようが，事実は逆なのである。また，中谷[5]はいちど除雪機で吹とばされたのちかたまつた雪が，同じ密度の自然のままのしまりゆきよりもヤング率が大きいことを実験的に確かめたが，この雪の組織は大小さまざまな大きさの粒子から成つている。図版III-10がその写真である。大きさのちがう粒子が混在しているため，粒子と粒子とのあいだの連結が頻繁になり，弾性係数が大きいという結果になつたものと考えられる。

積雪の機械的強さが，薄片にあらわれるような顕微鏡組織によつて定まることはいうまでもないことである。したがつて，組織の性質を表わすいくつかの指標が求められれば，それらの指標と機械的性質とのあいだに関係がみいだされるはずである。従来は，その指標として，積雪を構成する氷の粒子の平均の大きさをとり，それを粒径となづけて使つてきた。しかし，うえにあげたふたつの例からもわかるように，指標として粒径だけをとつたのでは，積雪の機械的性質とのあいだに，規則的な関係がみいだされるみこみはない。それで，ここでは一歩をすすめて，粒径すなわち氷粒子の平均の大きさのほかに，氷粒子の粒度分布，すなわち，積雪を構成する氷の粒子の大きさが揃つているかいないかの程度を，もうひとつの指標としてとることにしよう。アニリン固定法によつて積雪薄片を作り，粉体あるいは多結晶金属について行なわれる粒度分布を求める方法を用いれば，積雪の粒度分布を求めるのも困難ではない。実

際に用いたのは金属学で使われる Johnson の方法[14] である。この方法は，金属試料の任意の切断面上に現われる粒子の切り口の面積分布を求め，それに基づいて実際の立体的な粒度分布を統計的に求める方法である。粒子の形は，凹凸のはげしいあまりに複雑なものでない限り，同じでなくてもよい。積雪粒子の形はほぼこの条件をみたしている。第21図に，このようにして求めた薄片 12, 14 および，前掲の除雪機で吹きとばした雪（薄片 6）の粒度分布を示す。図の横軸は立体的な粒子の大きさ V で，単位はアメリカの試験用材料の規格 (ASTM) できめられたものである(註)。こうして求めた粒度の平均とその標準偏差は次のようになる。

$$\text{薄片 } 6;\quad V = +0.60 \pm 1.1 \quad \text{(ASTM)}$$
$$\text{薄片 } 12;\quad V = -0.73 \pm 0.55 \quad \text{(ASTM)}$$
$$\text{薄片 } 14;\quad V = -0.47 \pm 0.85 \quad \text{(ASTM)}$$

この値を見ると，薄片 12 の粒度は薄片 14 のそれよりもかなり大きい。これらふたつの薄片試料の密度は両者ともほとんど等しいので，小島の結果にしたがえば粘性係数もひとしくなるべきである。しかし，前にのべたように，平均粒度が小さい薄片 14 の方が，粒度の大きい薄片 12 よりも粘性係数は大きい。実際，薄片 12 と 14 とでは，組織の指標のひとつである V の平均値が -0.73 と -0.47 とのようにだいぶちがつている。さらに，もうひとつの指標である V の標準偏差にしたがつて粘性係数にひらきがみられることは当然のことと考えられる。粒度というものは，粒子間の連結を一応無視したうえで考えられる概念である。それに対して粒度の標準偏差は粒子間の連結の度合を推定させる要素をふくみ，標準偏差が大きいことは，粒子間の結合が強いことを暗示する。粒子の大きさが不揃いであるほど，大きな空隙はできにくいからである。そして，粒子間の結合が強いほど，一般には，積雪の機械的強度が大きいといえるであろう。第1表に薄片 12 と 14 の組織の強度，粒界の太さ，数を示したが，粒度の標準偏差の大きい薄片 14 の方が，薄片 12 よりも，粒界も太く，数も多く，そして強度は大きい。除雪機で吹とばした雪はことに強い雪であるが，上に示したように，この雪では W の標準偏差が非常に大きいのである。

しかし，粒度分布のうえには，しまり雪について見出された弱線は，どんな形としても，現われない。薄片の上にみいだしたからこそ弱線となずけたが，これは積雪のなかにある弱い曲面と薄片の面との切り口である。このような弱い曲面の存在が積雪全体の機械的性質に大きな影響を及ぼすことはいうまでもないことである。弱い面によつてもたらされる構造は，積雪の「団粒構造」とよんでよいであろう。粒度は氷の粒子の大きさすなわち，1 mm 以下の長さ

(註) ある粒子の立体的な大きさが V であるとは，倍率が 100 倍の顕微鏡写真上で測定した，その粒子の最大切断面積が 2^{2-V} 平方インチにひとしいということである。たとえば，ある粒子の最大切断面積が 2 平方インチならば，その粒子の V は 1 であり，1 平方インチならば V は 2 である。粒子が小さいほどは V は大きく，V が 1 だけ増すごとに粒子の最大切断面積は半分になる。実際はに，V には整数値だけを用い，たとえば，V が 1.5～2.5 (切断面積が 1.41～0.71 平方インチ) の範囲にあるものは，すべて $V=2$ とする。

に関するものであるが団粒構造の大きさ，すなわち弱線の長さは cm で表わされる程度である。積雪の機械的性質を考えるについて，この団粒構造を表わす指標を案出することが今後の課題となるであろう。

IX. 要　　約

アニリン固定法により厚さ 0.5～0.7 mm の積雪（しまりゆき，かたしまりゆき）の薄片を作り，−5°～−10°C の低温実験室で薄片の面にそう方向に 100～500 gr-wt/cm² の静荷重を加えて圧縮した。薄片の各点の変位を求め，それから積雪の各部分におこる変形を導き，変形と組織との関係を調べた。得られた結果をまとめると，次のようなことがいえる。

(1) 積雪組織の不均一性と内部歪との関係

(i) ふつうのしまりゆき（密度 0.4 以下）の組織は分域構造を示す。すなわち，結合の弱い箇所が線状につらなつて，全体を強い組織からなるいくつかの領域に分割している。強い領域を基本領域，弱い箇所をつらねる線を弱線と名付けた。基本領域の大きさは cm の程度である。密度が大きいかたしまりゆきになると，分域構造は消え，結合の弱い箇所は孤立して存在するようになる。密度が 0.5 に近い積雪では全体が 1 つの大きな基本領域であると考えられる。

(ii) しまりゆきの薄片の圧縮は弱線のところで集中的におこり，基本領域は僅かしか圧縮されない。(i) にのべた分域構造は，実は，まずこの集中的圧縮が観察されて見出されたのである。かたしまりゆきは，全体が比較的一様に変形する。

(iii) 弱線の機械的な強さを弱線の単位長さをまたぐ粒子の最小断面積の和で定義する。基本領域内に多くの曲線をかき，その単位長さをまたぐ粒子の最小断面積の和を求め，そのうちの最小値をもつて基本領域の強さとする。すると弱線の強さは基本領域の強さの 1/2～1/3 である。弱線を中心線とする帯状の領域を弱線帯と名付ける。薄片の単位面積内にある粒子間の連結部（粒界）の数は，基本領域での方が弱線帯におけるより 30～40% 多い。しかし，粒子 1 個当りに連結する隣接粒子の平均の数，および，それら粒子の最も細い部分の平均の太さは，いづれの領域においてもほぼ等しい。

(2) 氷の粒子における変化

(i) 10～20% 圧縮した薄片の氷粒子には，氷結晶の底面辷り，粒界辷り，粒界移動，粒界剝離，粒子の細胞化がみられる。

(ii) しまりゆきの薄片圧縮では，弱線にある粒子に底面辷りあるいは粒界辷りがおこり，変形がすすむと遂にはそこで破断する。しまりゆきの変形は主としてこれによつておこる。また底面辷りや粒界辷りを伴わないで最初から粒界が剝離することがある。

(iii) 粒界をはさむ氷粒子の結晶底面が粒界に平行にちかければ，粒界辷りはおこらず氷粒子内で底面辷りがおこる。両方の氷粒子の結晶底面がともに粒界に垂直にちかければ，底面辷りはおこらず，粒界辷りがおこる。

(3) 積雪の粘性

(i) 薄片全体の圧縮歪と時間との関係から，クリープ曲線を求めた。−8°～−12°C においては，遷移クリープが40～50時間つづきその後は定常クリープになる。この定常クリープ速度から求めた積雪の粘性係数は小島が野外の天然積雪の沈降から得た結果とかなりよく一致した。

(ii) 同じ密度の試料でも，その粘性にかなりの相違がある。積雪の粒度分布，組織の強度を調べてこの違いを説明した。

おわりに終始御指導をいただいた吉田順五教授，助言と援助を惜しまれなかつた藤岡敏夫助教授，木下誠一講師に厚く御礼を申し上げます。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) 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.
2) Kinosita, 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.
3) 小川和彦 1957 粉体科学序説. 日刊工業新聞社, 東京.
4) Manegold, E. von, Hofmann, R. und Solf, K. 1931 Ueber Kapillarsysteme XII. I. Die mathematische Behandlung idealer Kugelpackungen und das Hohlraumvolumen realer Gerüststrukturen. Kolloid-Zeit. ***56***, 142.
5) Nakaya, U. 1958 Visco-elastic properties of snow and ice in Greenland ice cap. Jour. Fac. Sci., Hokkaido University. Series II (Physics), ***5***, No. 3, 121.
6) Шумский, П. А. 1955 Основы структурного ледоведения. Издательство Академии Наук СССР, Москва.
7) 中谷宇吉郎 1958 氷の単結晶の変形 (1). 金属物理, ***4***, 89.
8) 若浜五郎 1958 氷の曲げ試験. 低温科学, 物理篇, ***17***, 87.
9) Cottrell, A. H. 1953 Dislocations and plastic flow in crystals. Oxford.
10) 若浜五郎 未発表.
11) Higuchi, K. 1958 The etching of ice crystals. Acta Metallurgica. ***6***, 636.
12) 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. 低温科学, 物理篇, ***19***, 73.
13) 小島賢治 1956 積雪層の粘性圧縮, II. 低温科学, 物理篇, ***15***, 117.
14) Johnson, W. A. 1946 Estimation of spatial grain size. Metal Progress, ***49***, 87.

Résumé

When snow is subjected to a load not sufficiently large to destroy its structure, its form is slowly changed by the phenomenon of creep. In order to see how the microscopic ice network of snow is deformed during the creep, a thin section of snow was observed under a microscope while it was undergoing a compressive creep. The thin section was prepared by the "aniline method" which the author, together with Dr. Kinosita[2)], had developed. The section was 0.5–0.7 mm thick and of area 2–3 cm × 2–3 cm. The compressive force was applied to the section by the apparatus shown in Fig. 1 of the text.

In that figure the section is indicated by D; it was pushed towards the right by a piece of metal G which was in turn pulled by the strings with weight W at their end. The stress applied was 100–300 dyne/cm² for the section of ordinary compact snow, 300–500 dyne/cm² for that of dense compact snow. The experiment was made in a cold room at −8°～−12°C. It is noted that the small cavities in the section were filled with liquid aniline, which prevented the ice network, without hindrance to its movement, from changing due to sublimation.

The whole area of the section was photographed before, during and after the application of stress. Photo. 7, Pl. II shows a section before the compression, while Photo. 8 is the same section after it had been contracted about 10 %. The displacements caused by the compression to many points of the ice network of the section can be determined from those photographs. The strain deduced from those displacements was found not to be uniform throughout the section; there were found curved lines as shown in Fig. 5 along which the strain was markedly large. The present author names those lines "weak lines." The whole area of the section is divided by the weak lines into "basic domains" within which the ice network is strongly constructed. Let x and y be the coordinates respectively in the direction of and perpendicular to the compression. Fig. 4 shows how u and v, x- and y- components of displacement of ice grains, change from point to point in the texture of the section. In Figs. 6 and 7 the component u, occurring on those ice grains lying along straight lines parallel to the direction of compression, is plotted against x. Within the regions joined with double lines such as A and B, change in u with x is small, which indicates that the texture underwent no or little compression in those regions. On the other hand, in those regions marked with dotted line such as C, u varies remarkably with x indicating a heavy compression. The dash-and-dot lines connecting those heavily compressed regions are the above-mentioned weak lines. The basic domains which are here indicated by the double lines are generally of the order of cm in linear dimension. Actually the weak lines reveal themselves as trains of large cavities in the thin section as illustrated by the thick lines in Fig. 14. The mechanical strength of a weak line can be defined by the total area of the cross sections of the ice grains crossing a unit length of it. The same definition of strength can also be applied to a basic domain by the use of any line arbitrarily drawn within the domain. It is found that the strength of a basic domain is two or three times as large as that of a weak line.

So far things have been considered on the plane of the thin section, but actually it has a thickness which permits the number of ice grains in a unit volume to be counted. That number was found to be 30–40% larger within a basic domain than at points near a weak line.

The domain structure as described above becomes less and less marked as the density of snow increases. With strong compact snows of density larger than 0.42, no weak lines were seen on their sections.

The compression caused many kinds of deformation to occur in the ice grains themselves. There were observed basal slip of ice grain (Photos. 3, 4, Pl. I), slip at grain

boundaries (Photos. 1, 2, Pl. I), internal fracture including the separation of ice grains at grain boundary (Photos. 5, 6, Pl. I), migration of grain boundary, cell formation in ice grain, etc. The deformation of compact snow is mainly due to basal slip, slip at grain boundary and separation of ice grains occurring along the weak lines in its texture. The basal slip lines observed can be classified into two kinds: coarse slip lines as shown in Photo. 4, Pl. I and fine slip lines as illustrated in Photo. 16, Pl. IV. The spacings between neighbouring slip lines are 75–160 μ with the coarse slip lines and 7–18 μ with fine ones. Prof. Nakaya[7] saw parallel stripes of about 60 μ spacing appear upon the surface of single ice crystal when he bent it. Those stripes may be the same as the coarse slip lines observed here.

Fig. 18 shows examples of creep curves of the thin section of snow. The viscosities of snow derived from these curves reasonably agree with the results obtained by Dr. Kojima[13] from the contraction of a natural snow layer in the field.

Snow of the same density does not always have the same viscosity, which fact can be explained on the basis of the difference found in the size distribution of ice grains.

図 版 説 明

図 版 I 圧縮によつて，積雪の組織に生じた変化の例。左側の写真はすべて，力を加える前の薄片の一部であり，右側は，それぞれ，力を加えて変形させてからとつた同一部分の写真である。

1, 2 結晶粒界辷りによる変形の例。1で矢印をつけた結晶粒界A, B, Cが辷りをおこして，2では食い違いをおこしたのがわかる。

3, 4 底面辷りによる変形の例。3の矢印をつけた粒子が，その結晶の底面で辷りをおこして変形したのが4で見られる。

5, 6 粒界剝離による変形の例。はじめは結晶粒界で接合していた2個の粒子（写真5の矢印のところ）が，力をうけた結果，粒界のところで6に示すように剝離した。これは一種の局所的な破壊である。

図 版 II 密度が0.381のしまり雪の薄片（薄片12）の変形前の写真7と，4日間20 gr-wtの力を加えられて，約10%圧縮変形したときの写真8。

図 版 III

9 密度が0.386のしまり雪の薄片（薄片14）の変形前の写真。この写真の上方に当る部分の組織が弱いことがわかる。

10 密度が0.49のかたしまり雪の薄片の写真。これは中谷教授がグリンランドから持ち帰られた雪の薄片である。除雪機で吹き飛ばされた雪が堆積したのちかたまつた雪で，弱線のないかたしまり雪の例としてここに示した。写真の下半分にとくに多く見える白い部分，たとえば，写真にA, B, Cと示したところは空隙ではなく，大きな粒子のかんなの切り口である。大小さまざまな大きさの粒子が混在していることがわかる。

図 版 IV 圧縮をうけた積雪薄片の組織に生じた微細な変化。

11, 12 顕著な底面辷りの例。11に矢印をつけた粒子が圧縮変形後，12に見られるように，矢をつけた2枚の面のところで底面辷りをおこして変形した。

13, 14 薄片12の組織に生じた底面辷りの例。13の矢をつけた粒子が，圧縮後，14の矢をつけたところで底面辷りをおこした。薄片12では，底面辷りとしてこのような不明瞭な辷り線だけしか見出されなかつた。

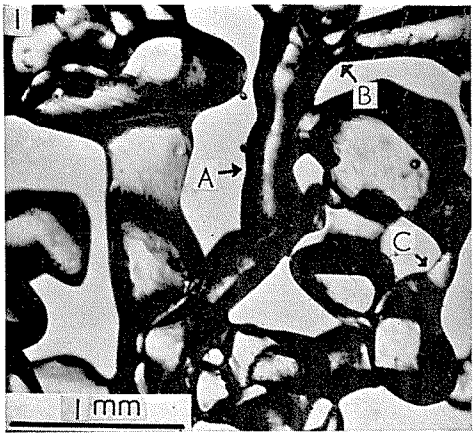
15, 16 普通の照明でうつした写真15と，斜めから光をあてて同じところをとつた写真16。15では，粒子Aに明瞭な変化は見られないが，16では微細な辷り線の平行線群がはつきりみえる。なお，粒子Bは，顕著な底面辷りをおこしたのが見られる。

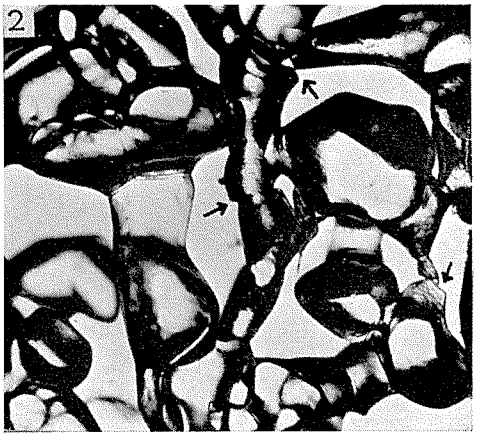
図 版 V

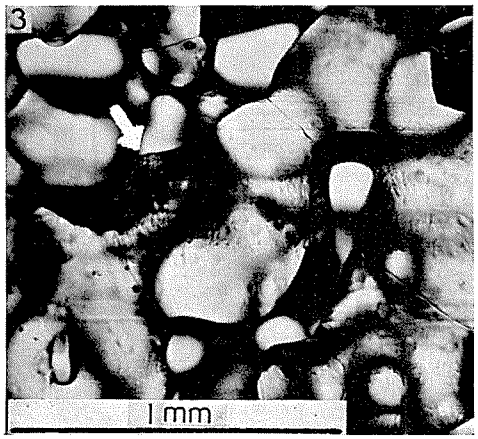
17 細長い粒子が底面辷りをおこしやすいことの例。矢印をつけた粒子に，密に並んだ辷り線が見える。

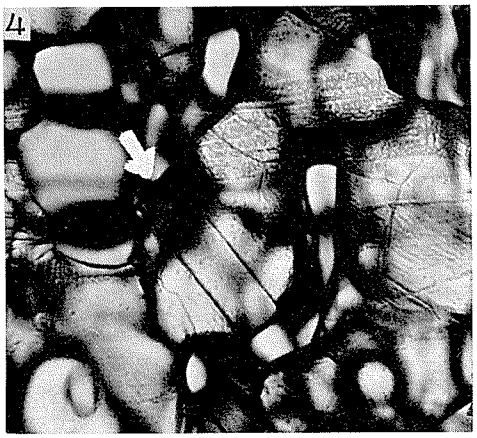
18 粒界をはさむふたつの粒子の結晶主軸が，ともに粒界に平行，すなわち結晶底面が粒界と垂直に近いときは，粒界辷りがみられることが多い。この写真の粒界Aの粒界辷りがその例である。また，粒子B, Cのはさむ粒界でも粒界辷りがみられるが，ここではそれと同時にBに顕著な底面辷りがおこり，この写真をとつてからまもなく，Bの矢をつけたところで粒子が切断した。これは一種の局所破壊である。

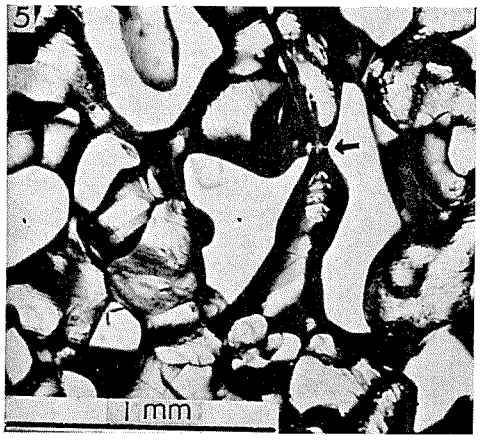
19, 20 粒界剝離による局所破壊の例。19の矢をつけた粒界が，圧縮後20に示すように剝離して粒子間の結合が破れた。

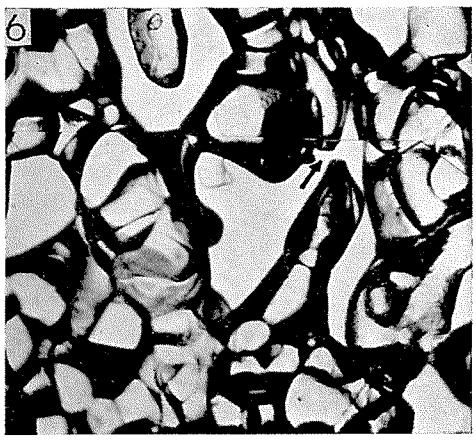

1
A
B
C
1 mm


2


3
1 mm

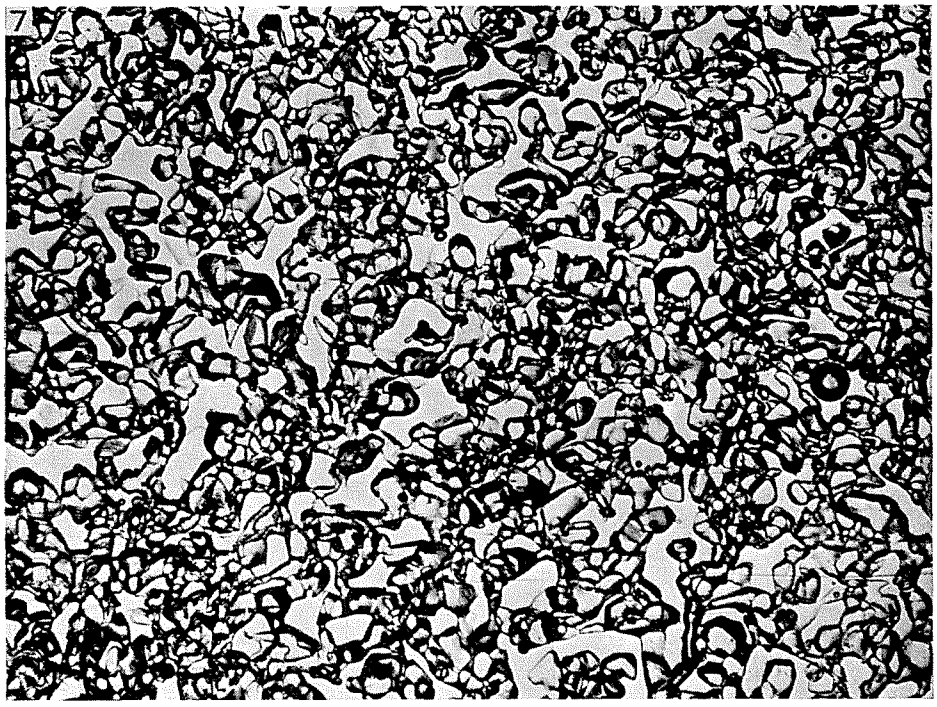

4


5
1 mm

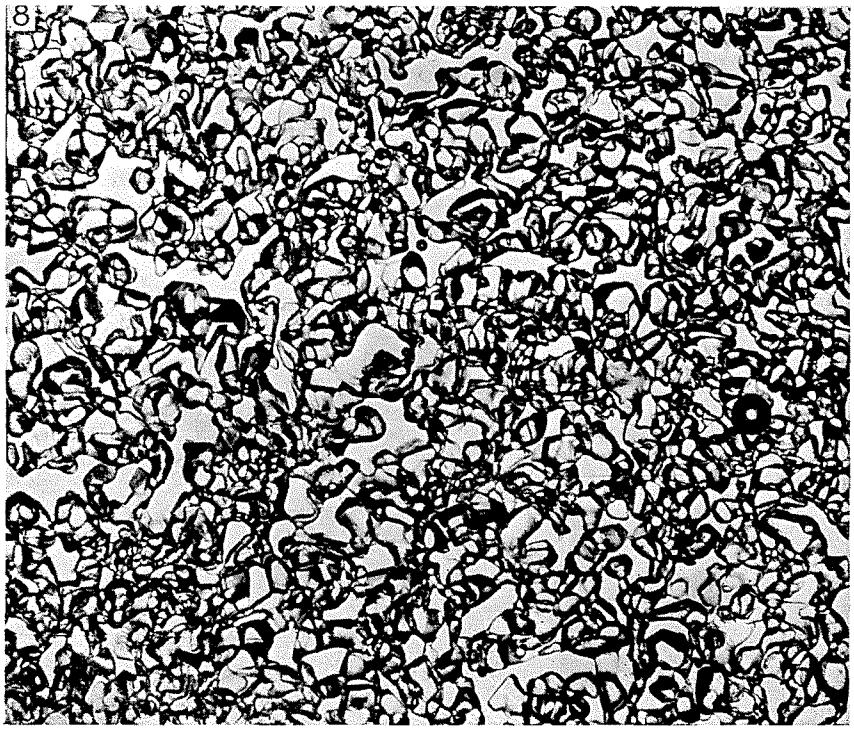

6

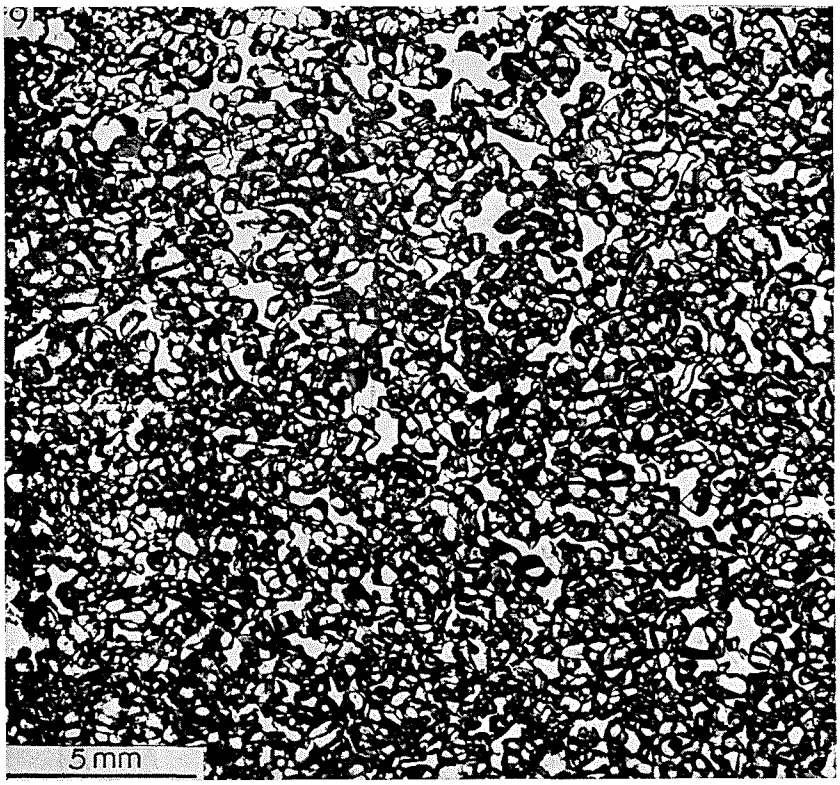
1 cm

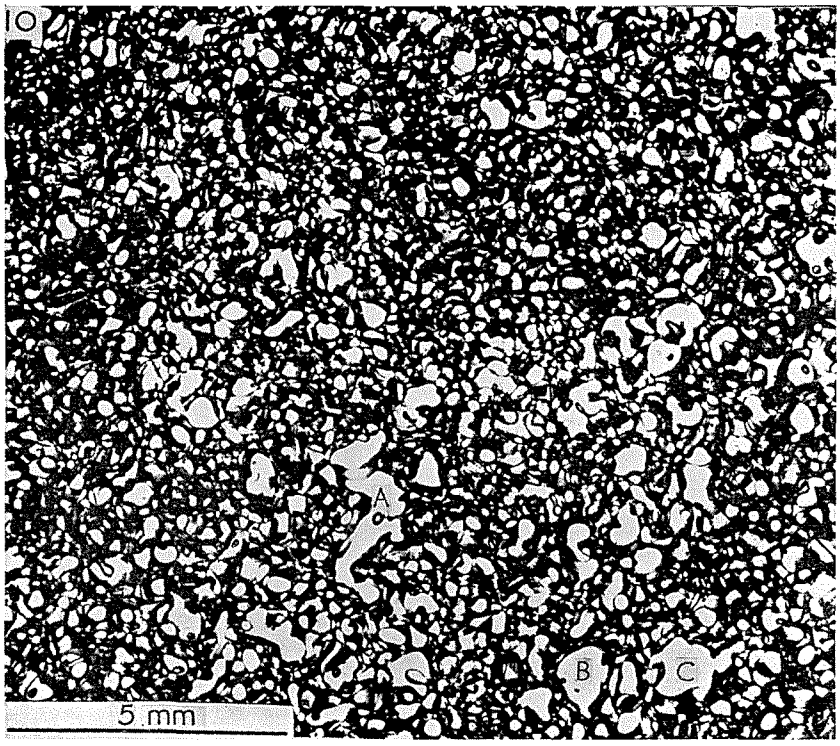
7

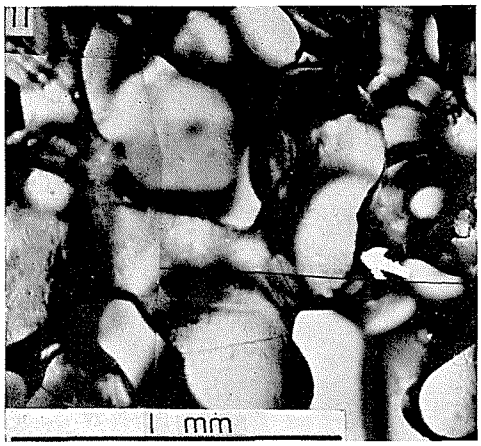


8

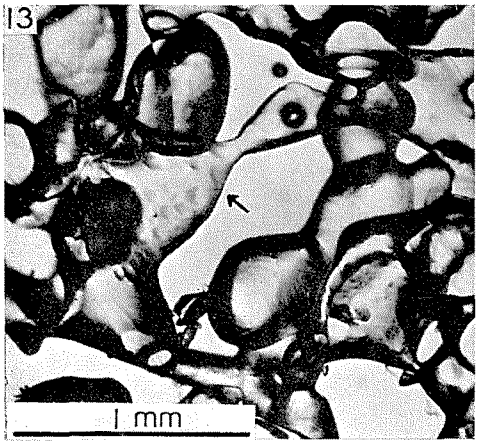


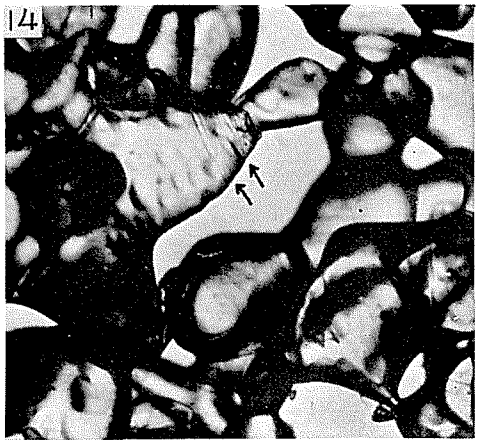

9
5 mm

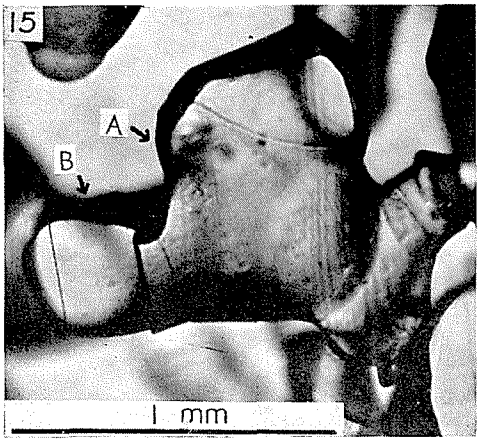

10
A
B
C
5 mm

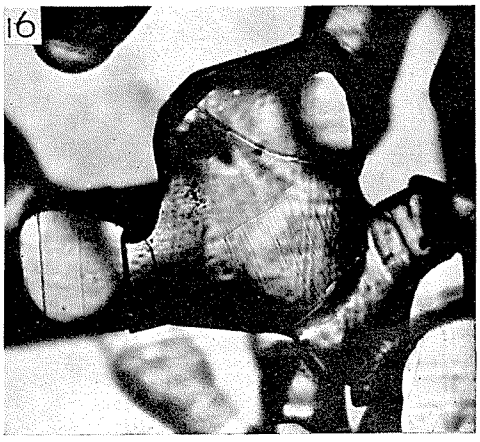

11
1 mm

12

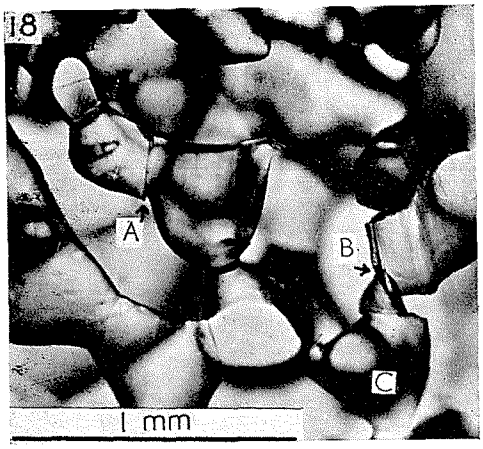

13
1 mm

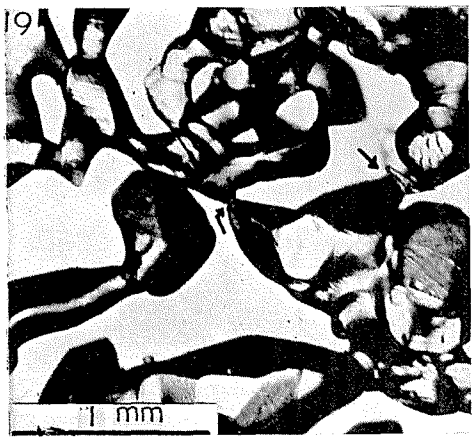

14

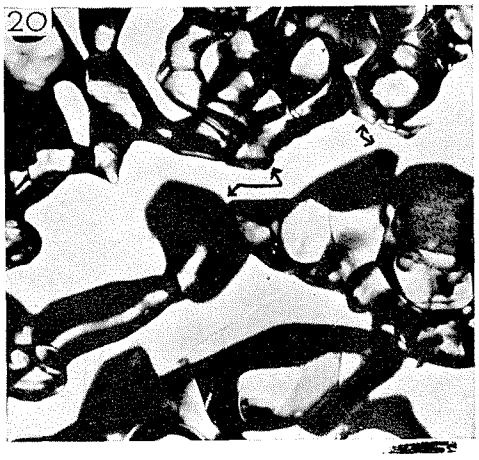

15
A
B
1 mm


16

17
1 mm


18
A
B
C
1 mm


19
1 mm


20