



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|------------------|---|
| Title | 偏圧による氷結晶主軸の定方位性についての実験的研究 I : 積雪および氷の一軸圧縮にみられる定方位性について |
| Author(s) | 渡辺, 興亜; WATANABE, Okitsugu; 大浦, 浩文 他 |
| Citation | 低温科学. 物理篇, 26, 1-28 |
| Issue Date | 1969-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/18076 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 26_p1-28.pdf |



偏圧による氷結晶主軸の定方位性についての実験的研究 I*

積雪および氷の一軸圧縮にみられる定方位性について

渡辺興亜**

(北海道大学大学院 理学研究科修士課程)

大浦浩文

(低温科学研究所 気象学部門)

(昭和43年7月受理)

I. はし が き

氷河から氷を切り出し、その中に含まれる多数の結晶粒の主軸方向を調べ、氷河の運動面を基準にしてその傾きを調べてみると主軸方向のなれば方に定方位性がみられる。氷河におけるそれらと氷河の構造の関係やその形成の機構については1930年代より研究が進められ、1950年代にはじまった Rigsby¹⁾による組織的研究によって、ほぼ明らかにされたといわれる。日本においても、木崎²⁾、東・橋本³⁾らによって、南極・アラスカの氷河の氷について調べられている。等面積投影網 (Schmidt net) に現れる極大域の型 (Fabric pattern) は1極大ないし多極大型を示す。一般には4極大 (Diamond pattern) を示すものが最も多い。結晶主軸が一定の傾きをもつだけでなく、いくつかの極大域に集中する機構については、多くの人々^{1), 2), 4)~7)}によって議論されている。しかし現在でもなお明らかにされていない点が多い。

単結晶や多結晶の変形についての実験は中谷⁸⁾、若浜⁹⁾、Rigsby¹⁾らによって行なわれている。これらの実験はいずれも単結晶又は2次元的な多結晶氷を取扱ったもので、実際の氷河内でひき起こされる現象を再現しているとはいいきれない。

木下¹⁰⁾は雪円柱の一軸圧縮による変形について一連の実験を行ない、雪円柱を限界速度 v^* (数 mm/min) で圧縮していくと雪円柱は破壊せずに氷化していくことを見つけ出した。筆者は、この木下の方法を用い、雪-氷円柱が変形していく際、その氷体内部の氷結晶主軸がどのように変化していくかを調べた。また、結晶主軸の傾きおよびそれらの集中度と、氷体内部の構造変化との間にどんな関係があるかを調べた。この論文では密度の小さな雪から純氷に近い密度をもつ氷粒集合体までを取り扱うので、氷というときは必ずしも純氷を意味せず気泡を含む氷を指す。雪と氷との境界としては気泡が個々に孤立して閉じこめられる密度 (普通 0.83 g/cm^3

* 北海道大学低温科学研究所業績 第926号

** 現在名古屋大学理学部水質科学研究施設 勤務

程度であるといわれている) にとることとする。したがって氷化という言葉は密度が次第に大きくなり、その境界に達すること、および達したのちは純水の密度 (0.917 g/cm^3) に近づくことを指すこととする。

II. 実験装置および実験方法

i) 実験装置

雪や氷を一軸圧縮するため万能試験機(島津製作所製 RH 10 型)を使用した。圧縮試験としては、定速度(定歪速度)圧縮および定荷重圧縮を行なった。しかし圧縮速度を厳密に一定に保つことは困難なので、実験中には、随時、歪量の実測をし、また荷重を一定に保つには手動によって調整した。

圧縮してできた氷の密度は中心部から直径 2.5 cm、厚さ 1 cm の円板を切り出し空気中の重さと灯油中の重さとを測って算出した。灯油の比重はそのつど測定した。積雪の比重はスノー・サンプラーにより一定体積を取り出して測定した。

ii) 温度条件

雪や氷の変形速度と応力との関係は温度条件と密接な関係をもっている。この実験を行なった低温室内の温度変化は比較的小さく $-18 \sim -22^\circ\text{C}$ の範囲にあったので特に試験機に付属した恒温装置は使わなかった。以下にのべる実験結果はすべてこの温度条件下 $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ で行なわれた実験によるものである。

iii) 実験の試料

A. 自然積雪円柱

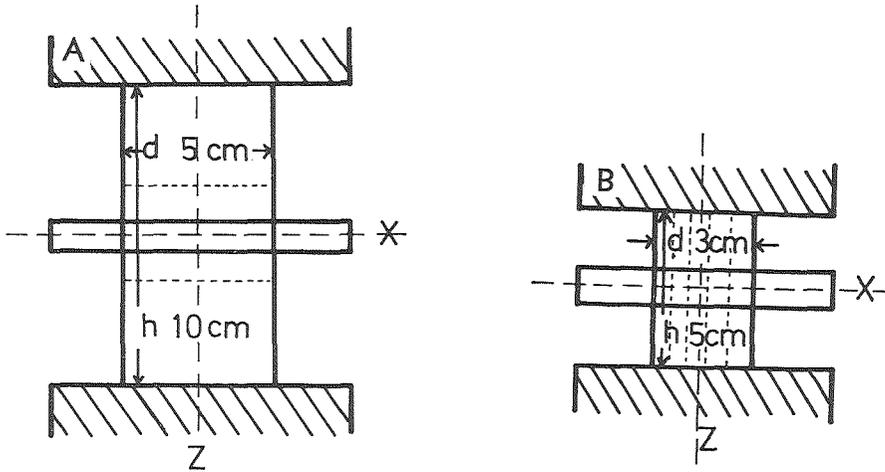
自然に堆積した氷板を含まない雪の塊りから、その堆積面が圧縮の方向 z に垂直になるように切り出した円柱である(第 1 図 A)。雪質はしまり雪で、粒径は $0.3 \sim 0.6 \text{ mm}$ 程度(第 2 図 A)、密度は $0.37 \sim 0.40 \text{ g/cm}^3$ の範囲である。試料の大きさは直径 5 cm、高さ 10 cm である。

B. 無定方位積雪円柱

自然積雪の粒子の結晶方位には多少とも定方位性がみられる。全く定方位をもたない試料をつくるために次のような方法を用いた。積雪を粉々にして 0.85 mm の目をもつふるいを通し、その最大粒径をそろえる。これを成型箱(円筒)の中につめ、雪の温度を幾分上げて焼結を促進し、それによってしっかりした円柱をつくる。この積雪円柱に含まれる氷粒の大きさは不そろいなので、密に充填され、密度は、 $0.57 \sim 0.63 \text{ g/cm}^3$ になる。この円柱の大きさは自然積雪円柱と同じである(第 1 図 A)。この試料が無定方位であることは第 5 図の組織図表からわかる。

C. 既圧氷円柱

第 1 図に示したように、圧縮の方向を z 、それに垂直な 1 つの方向を x とする。最初 z 方向に圧縮して氷化させ、これらから切り出した氷の板数枚を z 軸をそろえて重ね合せ円柱に成型したものを既圧氷円柱とよぶこととする。ここでは特に、既圧氷円柱の軸が過去における圧縮方向に垂直な場合だけを取扱う。この既圧氷円柱の圧縮は圧縮軸を 90° 変えたことに相当する。つまり 90° の換軸圧縮である。この氷円柱の密度は 0.87 g/cm^3 前後で、その大きさは直径



第1図 試料の見取り図

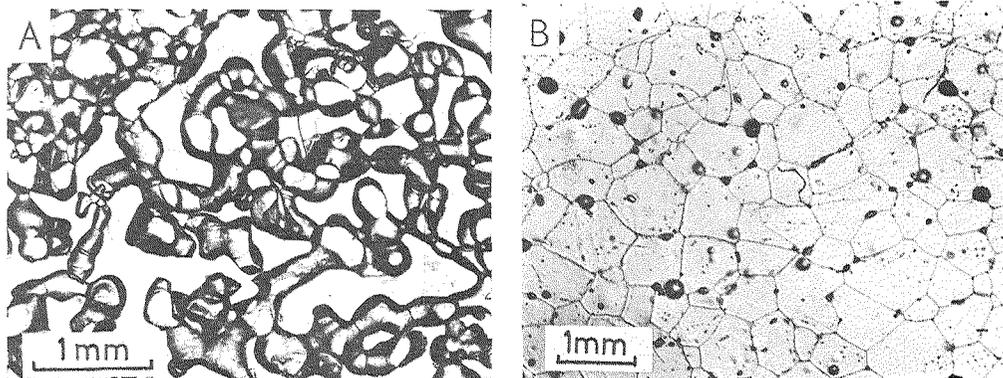
- A: 自然積雪または無定方位積雪円柱
 水平な点線は自然積雪の堆積面の方向を示す
- B: 既圧水または無定方位水の円柱
 縦の点線は既圧水の貼り合せ面を示す
- A, B 何れも中央部に示してある水平な板程度の厚さになるまで圧縮した

3 cm, 高さ 5 cm である (第1図 B)。

D. 無定方位氷円柱

ふるいを通した雪粒を押し固めて作った雪塊を 0°C の水につけ、ゆっくり氷化させてできた氷塊から円柱を切りとったものを無定方位氷円柱とよぶ。この中には多数の気泡が取りこまれており密度は 0.88~0.90 g/cm³ の範囲にあり、既圧氷円柱と同程度である。それらの圧縮前の氷組織は第2図 B に、結晶の粒度分布は第11図 D₁ に示されている。比較のため自然積雪の組織は第2図 A に示されている。円柱の大きさは既圧氷円柱と同じで、第1図 B に示されているように直径 3 cm, 高さ 5 cm である。

iv) 圧縮の方法



第2図 試料の薄片写真

- A: 自然積雪 B: 無定方位氷

A. 圧縮速度 v_1 (0.05~0.07 mm/min) で反抗力* が 5×10^3 kg-wt に達するまで定歪速度圧縮を行なう。

B. 圧縮速度 v_1 で、反抗力が 10×10^3 kg-wt に達するまで定歪速度圧縮を行なう。

C. 圧縮速度 v_1 で、定歪速度圧縮を行ない、反抗力が 5×10^3 kg-wt、または 7×10^3 kg-wt に達した後、定荷重圧縮に切りかえ 60 分放置する。

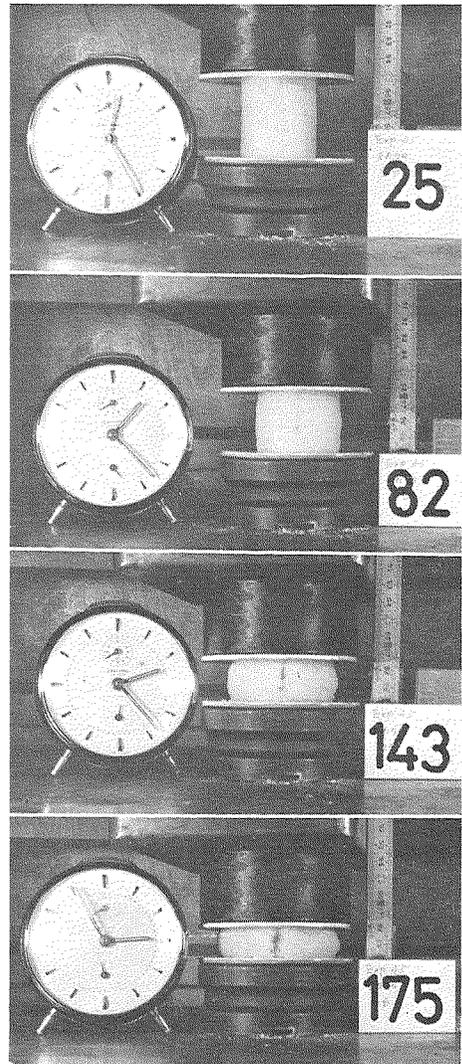
D. 密度の大きい氷円柱 (既圧氷円柱・無定方位氷円柱) を、圧縮速度 v_2 (0.02~0.03 mm/min) で定歪速度圧縮を行なう。この場合歪が 90~95% に達したとき、反抗力は $(2.9 \sim 3.0) \times 10^3$ kg-wt に達した。

A, B および C の圧縮方法を用いた場合、いずれも密度の小さい積雪円柱なので、円柱の上下面をアクリル樹脂の円板ではさむと、最初のうちは上下面で滑らないが、圧縮がすすむにつれて横方向 (半径方向) への滑りが生じる。しかし iii C, iii D に述べたような密度の大きい試料を用いる場合、そのようにすると、圧縮初期に、円柱の中心を通るような \approx 方向のさけ目が生じ、圧縮変形する前に破壊される。そこで粗い面をもつ真鍮の円板で氷円柱をはさんで圧縮した。こうすると A・B・C の圧縮方法で得られた時と同様な過程で変形し縦割れしない。積雪円柱の変形の様子は、すでに木下の論文¹⁰⁾の中に示されているので、ここでは密度の大きな氷円柱の変形の様子だけを示すことにする (第 3 図)。

これら 4 種の圧縮変形における反抗力 F -時間および F -ひずみ曲線を第 4 図に示す。図中の密度は、それぞれの方法で変形されたとき、試料が達した密度である。

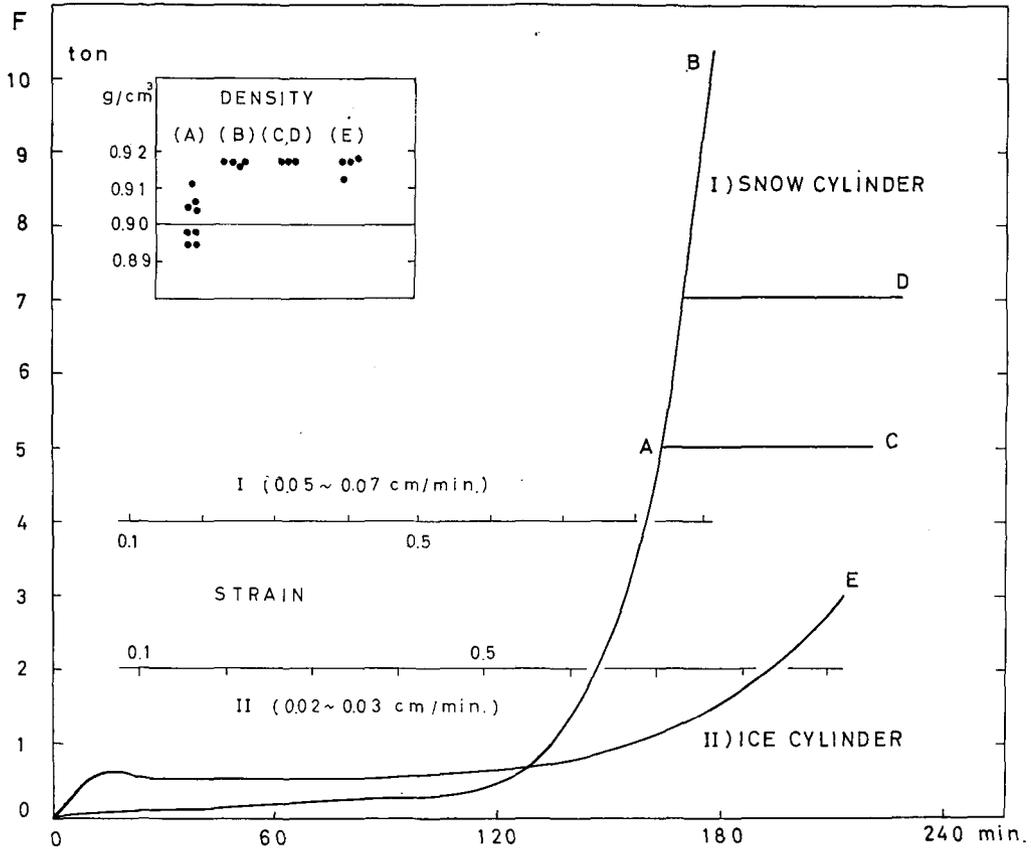
v) 氷結晶主軸の測定

第 11 図に示されているように、圧縮氷化した試料の氷の粒径は 0.1~0.2 mm のものが最も多い。粒径が小さくて野外 (氷河水) 用ユニバーサル・ステージを使用することが出来ないので、岩石鋳物用ユニバーサル・ステージを偏光顕微鏡にとりつけて、氷結晶の主軸方向を測定し



第 3 図 氷円柱 (無定方位, 既圧氷) の圧縮変形
右下の数字は圧縮時間 (単位は分) を示す

* 氷又は雪の柱の反抗力。圧縮試験機の指示値そのもの。



第4図 反抗力 F の時間的变化

A, B, C は積雪円柱の圧縮終了状態を, D, E は氷円柱のそれを示す。図中左上にその時の密度を示す

た。この場合、氷の屈折率に合った半球が無かったので、半球を使わずに測定し、あとで屈折率の補正をした。測定した方位をシュミット・ネットに投影し、統計的に処理して組織図表 (Fabric diagram) を作製した*。組織図表の円の中心は z 軸つまり圧縮の方向を示し、円周は xy 平面に含まれる方向を示す。組織図表中にひかれた結晶主軸方向の分布を示す曲線中の数字は、極大域または亜極大域の集中度 (パーセンテージ) を示す**。組織図表の円外右すみの数字は結晶主軸 (c 軸) の測定数を示したものである。これをどの程度とれば最も適当であるかは古くから議論されているが、氷河水の場合、一般に強い定方位性を示すので100個程度の測定数で十分とされている¹³⁾。しかしながら、この実験の場合は、どの程度の方位性があるかわかっていないので、氷河水の場合と同様に取り扱うわけにはいかない。したがって実証的方法で測定数を決定することにし、1つの薄片について100・200・300個まで測定し、それぞれにつ

* これらの方法については文献11)~13)等に記されている。

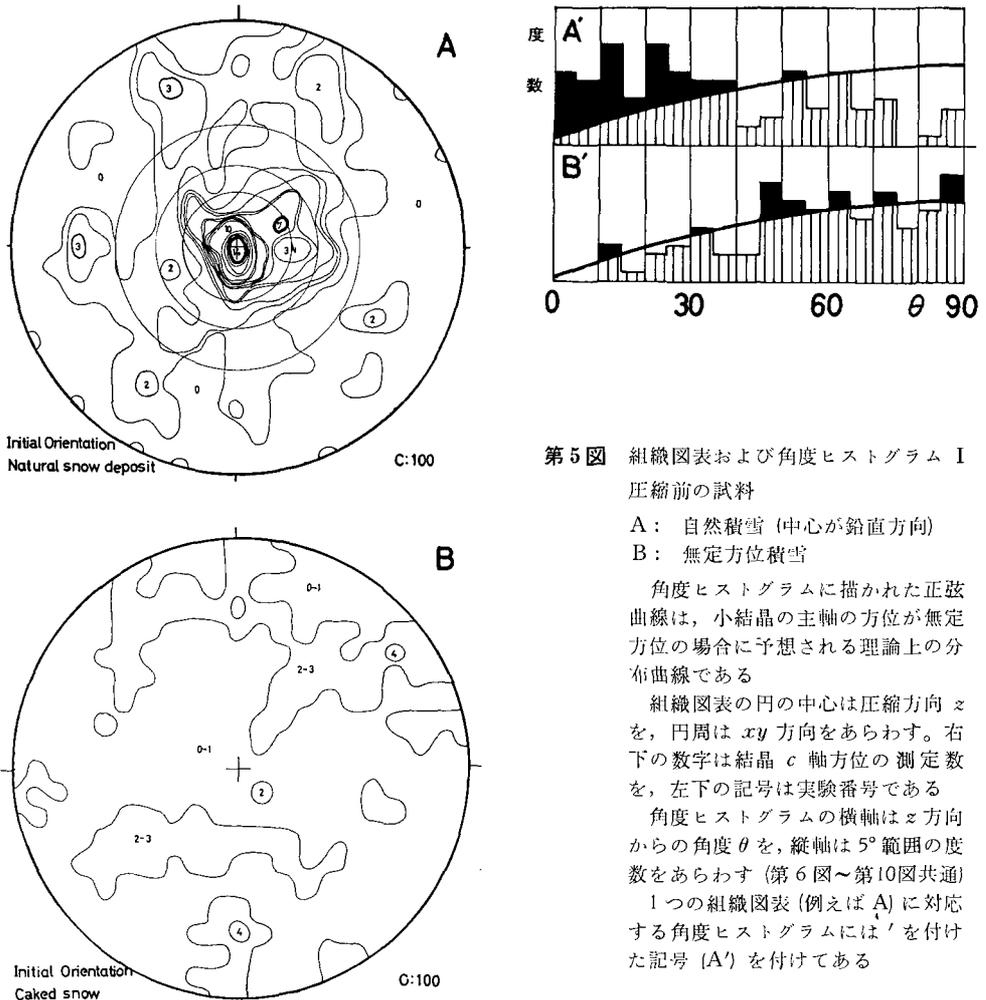
** シュミット・ネット全面積の100分の1の面積 (実際は立体角 $2\pi/100$) 中に含まれる軸の数の全測定数に対する割合。

いて組織図表を描き、全体の型・極大の位置等について調べた。300個以上になると、測定に時間がかかって氷が昇華するため、技術上測定不可能である。これらの組織図表(第10図A~A300)をみると、測定数100の場合と300の場合とでは、その極大域を作る位置や全体の型の上でさほどの変化はない。そこでその後の測定数を100とした。

III. 実験結果

1. 組織図表

第5図は積雪試料の圧縮前の結晶主軸の傾きを示したものである。Aは自然積雪、Bは第II節に述べた方法で人工的に作った無定方位積雪である。しかしこの図は直接積雪試料から測定されたものではない。アニリン法を用いれば雪を薄片にすることが出来る。しかしアニリンを融解させると雪粒が浮動し、方位の決定ができない。0°Cの水につけた雪を静かに凍結させ



第5図 組織図表および角度ヒストグラム I
圧縮前の試料

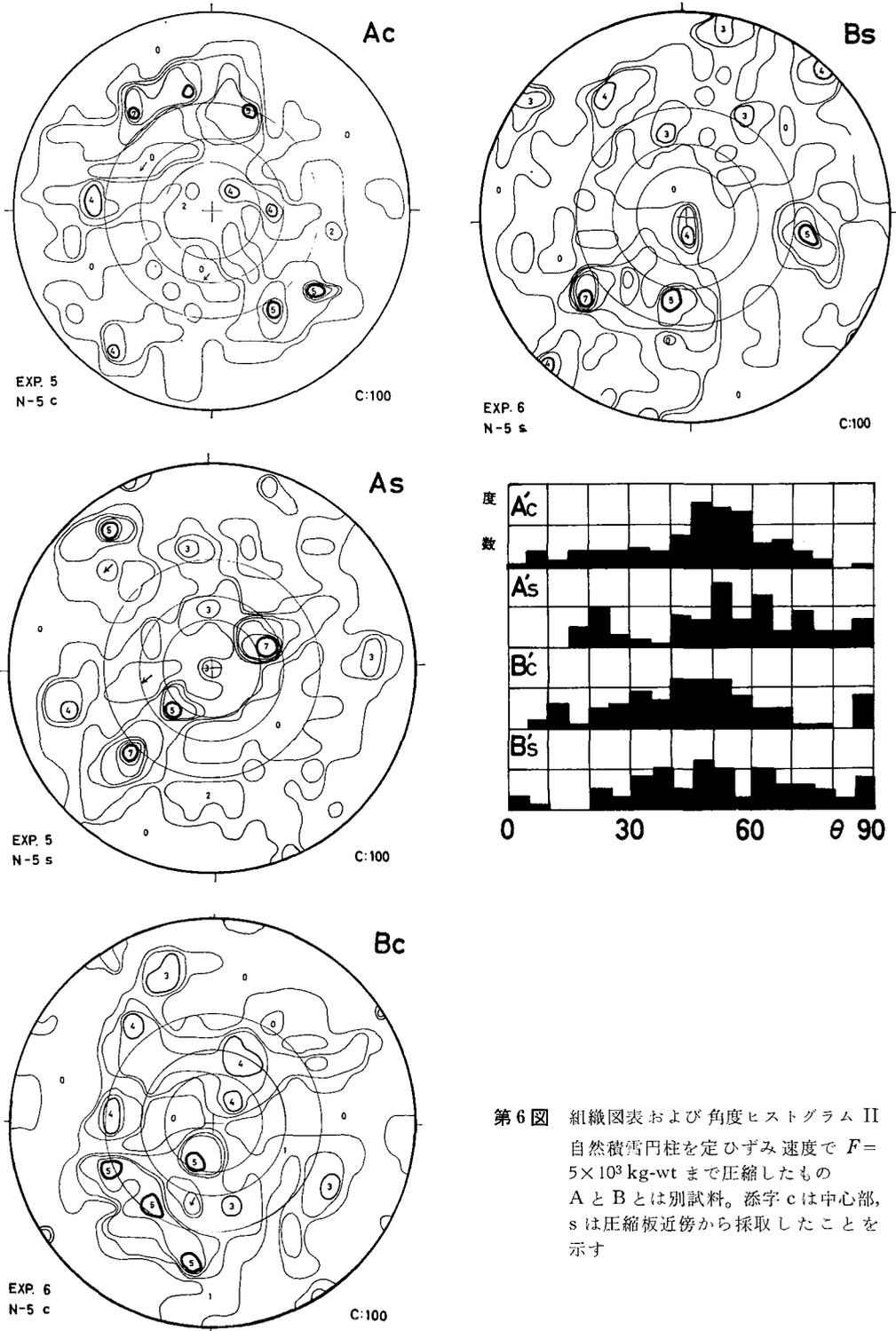
A: 自然積雪 (中心が鉛直方向)
B: 無定方位積雪

角度ヒストグラムに描かれた正弦曲線は、小結晶の主軸の方位が無定方位の場合に予想される理論上の分布曲線である

組織図表の円の中心は圧縮方向 z を、円周は xy 方向をあらわす。右下の数字は結晶 c 軸方位の測定数を、左下の記号は実験番号である

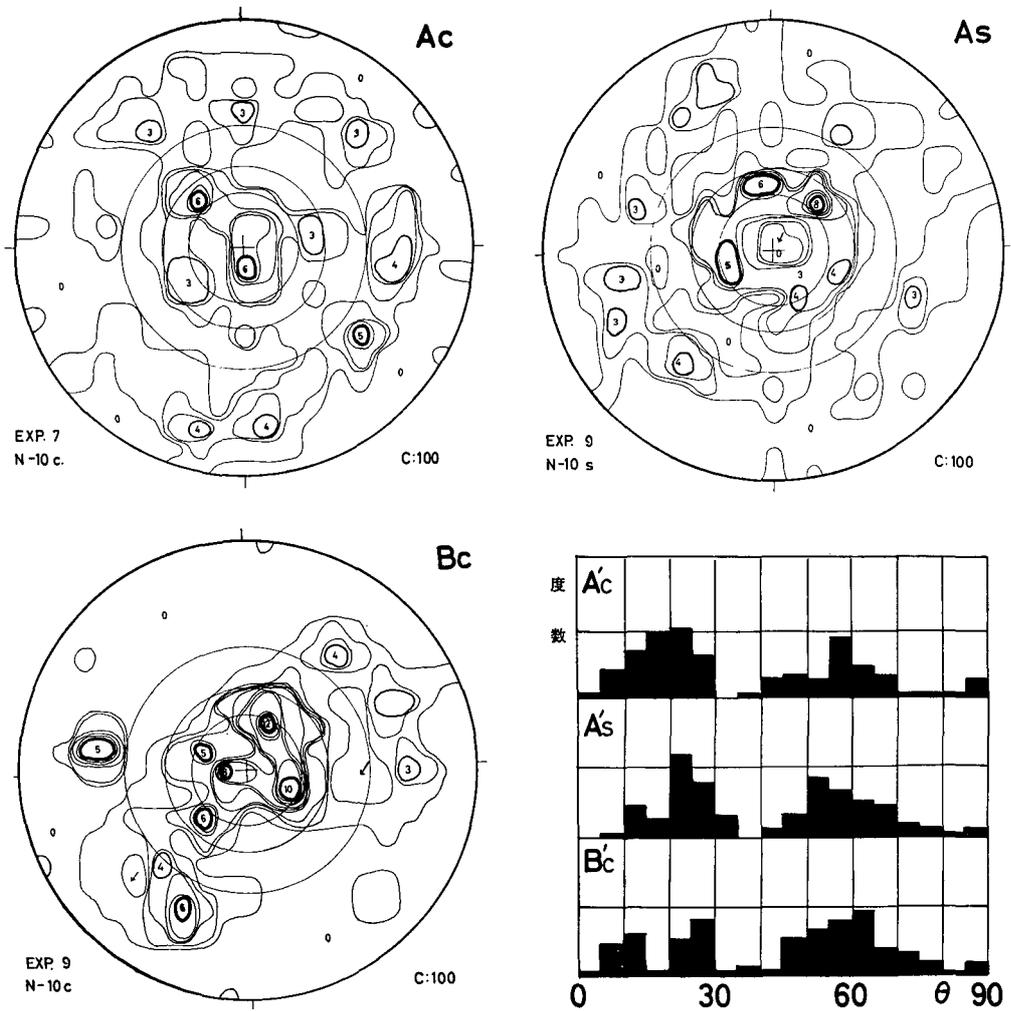
角度ヒストグラムの横軸は z 方向からの角度 θ を、縦軸は 5° 範囲の度数をあらわす (第6図~第10図共通)

1つの組織図表(例えばA)に対応する角度ヒストグラムには'を付けた記号(A')を付けてある



第6図 組織図表および角度ヒストグラム II
 自然積雪円柱を定ひずみ速度で $F=5 \times 10^3$ kg-wt まで圧縮したもの
 A と B とは別試料。添字 c は中心部、s は圧縮板近傍から採取したことを示す

た場合、最初の雪粒子の結晶主軸の方向が保存されると考え、第 II 節 iii D の方法で一たん氷にして測定されたものである。A'・B' は圧縮の方向 α からの傾き角だけの度数ヒストグラムにして示したものである (これを角度ヒストグラムとよぶ)。角度ヒストグラム中に示された正弦曲線は主軸の方向が全立体的角中に一様に分布している場合、つまり組織図表全域が 1% を示した場合のものである。A'・B' をみると、自然積雪 A' が比較的強い定方位をもっていることがわかる。極大の方向は堆積面に垂直な方向である。これは雪の結晶が一般に c 軸に垂直な板状であることによると考えられる。一方 B'・B' では、定方位性がみられない。このことは、人工積雪の作成法がその目的に適っていたことを意味するばかりでなく、雪の結晶主軸の方向決定法として先にのべた方法が適当であることも示している。

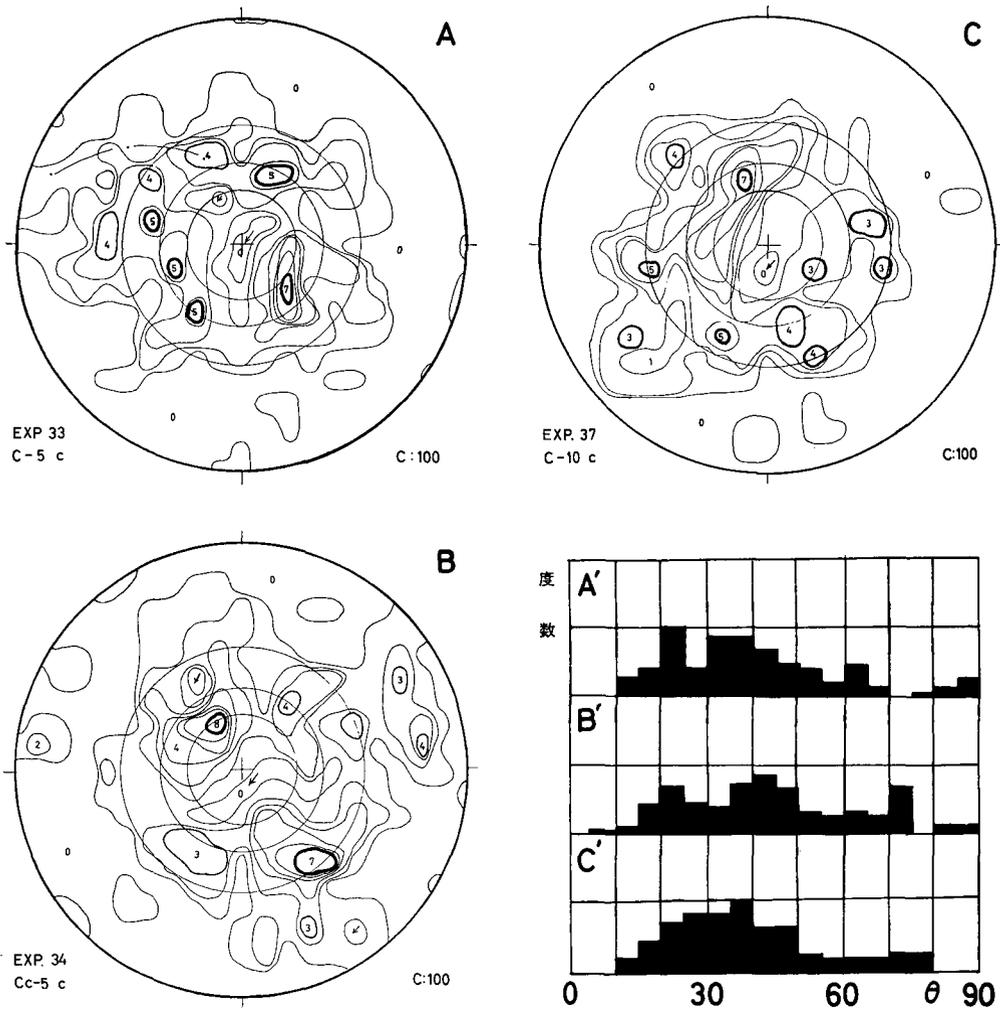


第7図 組織図表および角度ヒストグラム III

自然積雪円柱を定ひずみ速度で $F=10 \times 10^3 \text{ kg-wt}$ まで圧縮したもの
A と B とは別試料。添字 c, s は第 6 図に同じ

第6図は積雪円柱を、第II節ivAの方法で圧縮した試料の組織図表である。図版記号に添字としてつけられているc, sの記号は同じ圧縮氷体内の薄片採取位置を示したものである(第16図II)。cは圧縮氷体の中央から、sは圧縮板と接した面からとられたことを示す。A_c~B_sをみると、この段階(反抗力が 5×10^3 kg)ではその組織図表中の極大群の型に特別なものは現われていない。極大は5~7%程度の集中度で、あまり大きな値ではない。角度ヒストグラム(A_c~B_s)をみると、40~60°に広い山を作っており、全体の傾向は何れもほぼ同様である。組織図表・角度ヒストグラムとも薄片採取位置による相異は現われていない。

第7図は自然積雪円柱を反抗力が 10×10^3 kg-wtに達するまで圧縮したものの組織図表である。組織図表中の極大、亜極大群が半径の異なる円周上にならんでいることがわかる。これ

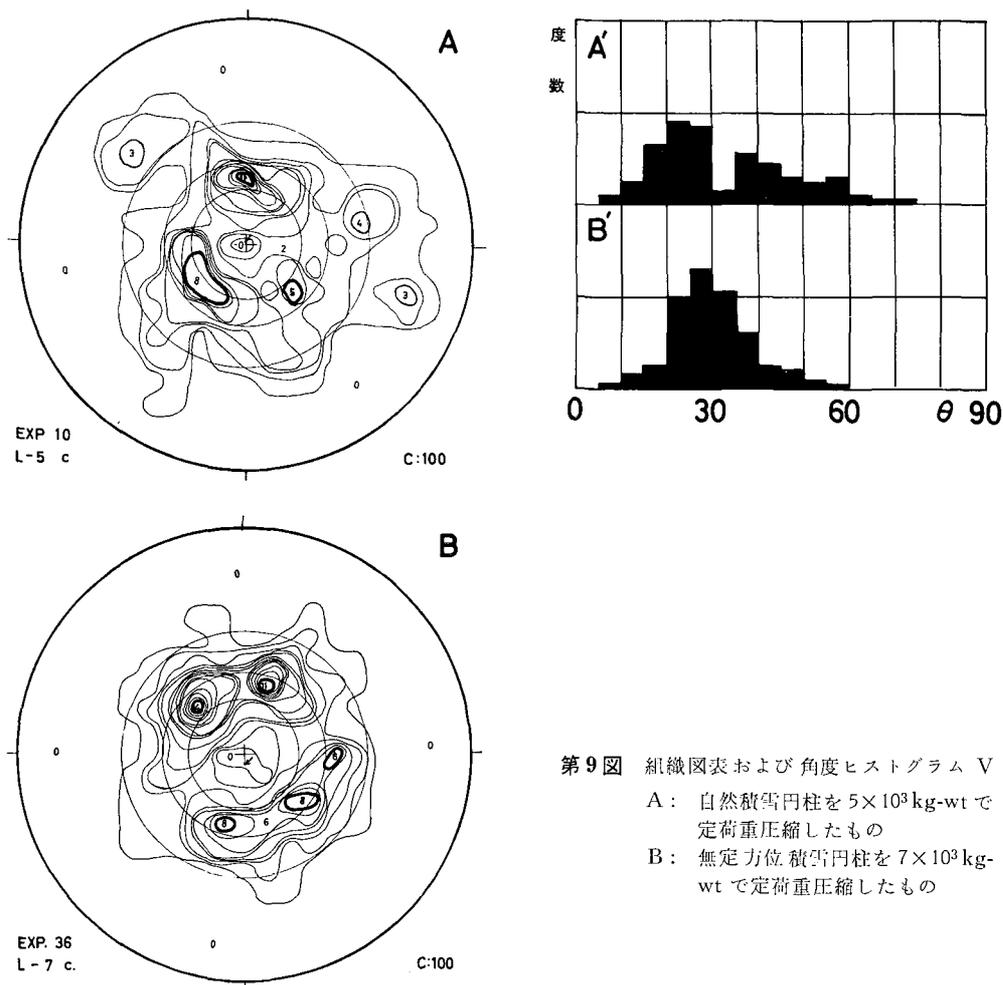


第8図 組織図表および角度ヒストグラム IV
 無定方位積雪円柱を定ひずみ速度圧縮したもの
 A, B: 5×10^3 kg-wt まで圧縮, C: 10×10^3 kg-wt まで圧縮

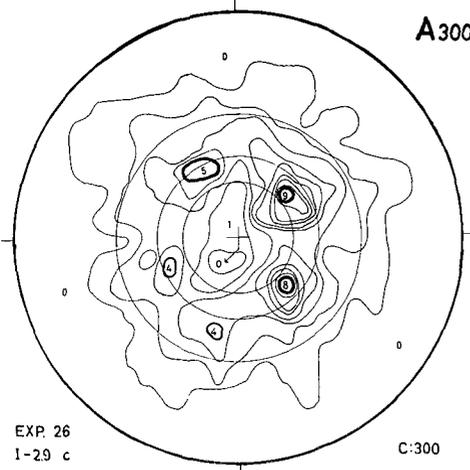
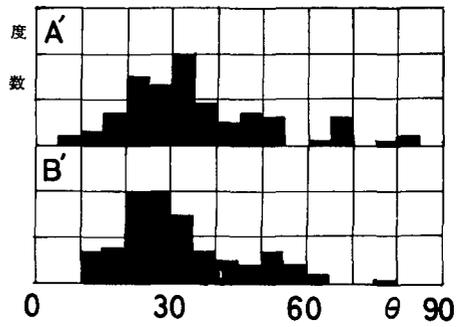
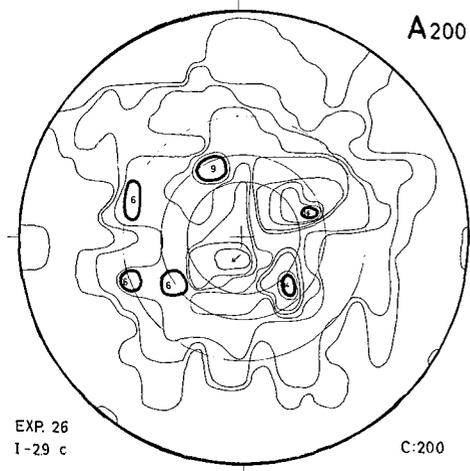
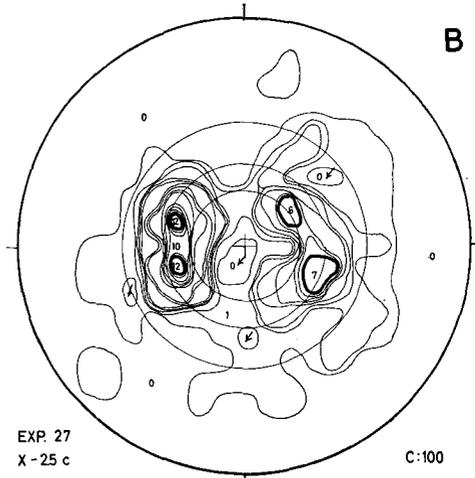
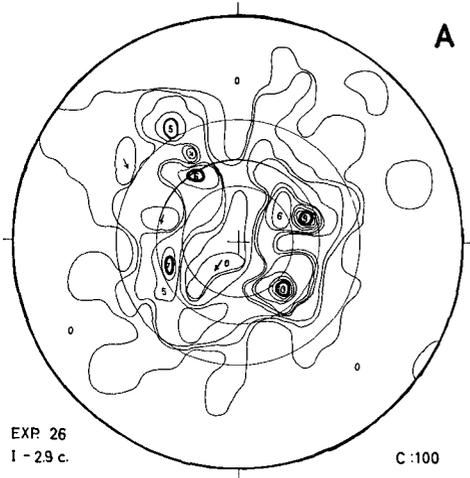
は角度ヒストグラム $A'_c \sim B'_c$ にも明瞭に現われている。15~30°の間および50~60°の間に山がみられ、これは第6図に示されたものとは全く異なっている。角度ヒストグラムのいずれにも主軸が圧縮方向に垂直なもの(85~90°)が、比較的少ない数ではあるが、認められることは興味深い。この実験の場合においても、 A'_c と A'_s とにみられるように薄片採取位置による相異はない。

第8図は無定方位積雪円柱を圧縮し、反抗力が 5×10^3 kg-wt (図上の A・B) および 10×10^3 kg-wt (C) に達したものの組織図表である。これらの角度ヒストグラムをみると山が1つであることは第6図によく似ているが、山の位置は20~50°にあり、全く異なっている。

第9図 A は自然積雪円柱を 5×10^3 kg-wt で、Bは無定方位積雪円柱を 7×10^3 kg-wt で定荷重圧縮(II iv C)したものの組織図表である。組織図表をみると、30°附近に強い集中がみられる。角度ヒストグラム B' をみると、25~30°のところに山を作り、分布の型はほぼ左右対称である。25~30°の間のある角度に集中しつつあることが予想される。この角度ヒストグラムが



第9図 組織図表および角度ヒストグラム V
 A: 自然積雪円柱を 5×10^3 kg-wt で定荷重圧縮したもの
 B: 無定方位積雪円柱を 7×10^3 kg-wt で定荷重圧縮したもの



第10図 組縮図表および角度ヒストグラム VI
 A: 無定方位氷円柱を定ひずみ速度で約 3×10^3 kg-wt まで圧縮したもの
 B: 既圧氷円柱を定ひずみ速度で約 3×10^3 kg-wt まで換軸圧縮したもの

5°区切りになっているのは、薄片作製時および方位測定の際に1~2°の誤差があると予想されるからである。もしこの誤差を無視すると、その集中角は圧縮方向から28°になる。Bの組織図表は、5つの極大群(2列の山に相当する)とその間に入りこむ低集中度域の谷間があるのが特徴である。極大の数にいくらかの変動はあるが、この型(pattern)はこの実験によって得られた組織図表の基本型である。型態上、氷河水にみられる4極大(ダイヤモンド・パターン)に似ているが、両者にどんな関連があるかは今のところわからない。円柱を圧縮する場合、圧縮軸 \times 軸のまわりのどの方向も同等なはずであるから、小円ガードルができるものと予想されるが、実験結果は前述のようになった。

第10図は氷円柱を第II節ivDの方法で圧縮変形させたものの組織図表である。第10図AおよびA₂₀₀, A₃₀₀は無定方位氷円柱を試料とし、第10図Bは換軸圧縮を行なうため既圧氷円柱を試料として、圧縮したものである。A₂₀₀, A₃₀₀はAと同一の圧縮水体からとりだした薄片について、測定数を変化させ、それによって組織図表を描いたものである。組織図表の型は第9図Bとよく似ている。Bは4極大となっている。組織図表の型については後で再び述べる。角度ヒストグラムに現われた山はA, Bとも20~35°に位置し第9図の角度ヒストグラムと同じである。

2. 圧縮氷体内部的変化

i) 粒度分布

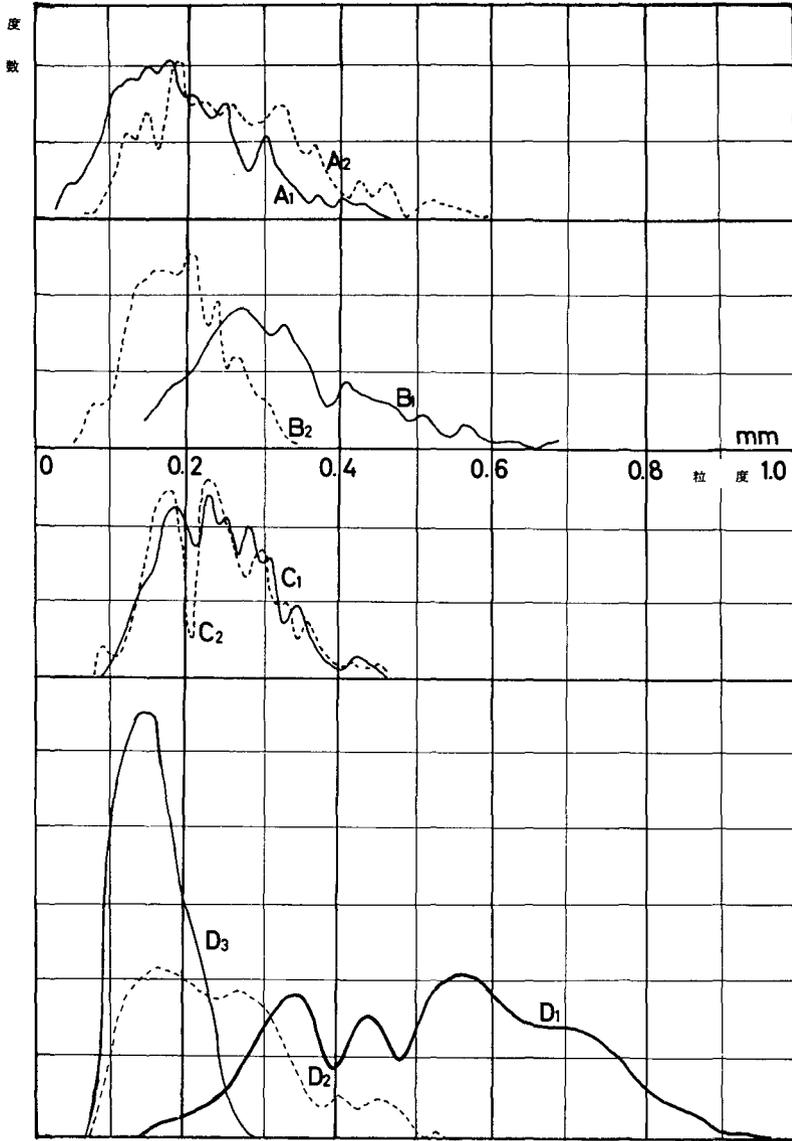
第11図は、積雪円柱の圧縮氷化ならびに氷円柱の圧縮変形によって、雪-氷円柱内部の水結晶の粒度がどのように変化していくかを示したものである。ここで示されたものは真の結晶粒度の分布ではなく、圧縮軸に垂直な薄片面に現われている結晶の断面を、円の面積におきかえ、その直径の分布として示したものである。便宜上これを粒度分布とよぶことにする*。A, Bはそれぞれ自然積雪、無定方位積雪の 5×10^3 または 7×10^3 kg-wt までの圧縮、Cはその後の定荷重圧縮、Dは無定方位氷の圧縮および既圧氷柱の換軸圧縮による結果を示している。圧縮前の粒度分布はD₁として無定方位氷のものが示されているが、自然積雪、無定方位積雪は示されていない。前者は第2図Aの顕微鏡写真に示されているように0.3~0.6 mm程度であり後者もほぼこれに準ずる。

第11図から次のことがわかる。

- (1) 圧縮変形の進行に伴って結晶は細粒化する。
- (2) しかし無限に細粒化することなく、この実験の場合は、0.1~0.2 mmの範囲に落ち着く。
- (3) 粒度分布がA₁のような氷を定荷重圧縮するとC₁のような分布になる。山の位置が右(粒径の大きい方)に寄る。このことは木下¹⁰⁾がすでに報告している。

圧縮による結晶の細粒化の機構について、主として2次元的な場での実験は若浜^{9), 15)}がすでに報告している。しかし3次元のひろがりをもつ多結晶氷の場合については十分わかっていない。何れにしてもおそらく結晶粒界の移動によって応力が緩和される時間より、応力の増加

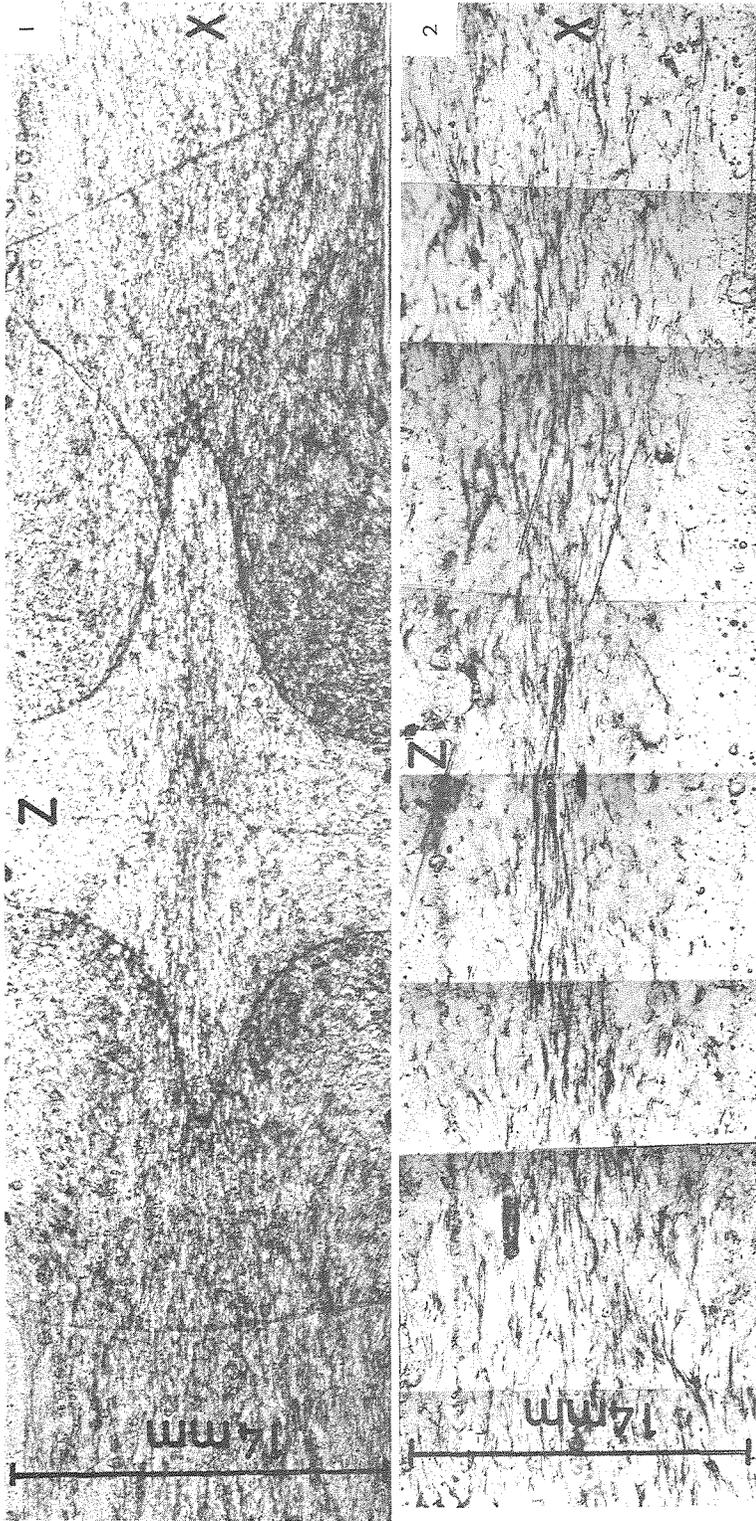
* この分布は決して正確な粒度分布ではない。正確な粒度分布を求めるには、例えば大浦・小林¹⁴⁾の方法がある。しかし定性的ないまの議論にはこのままで差支えない。



第11図 粒度分布

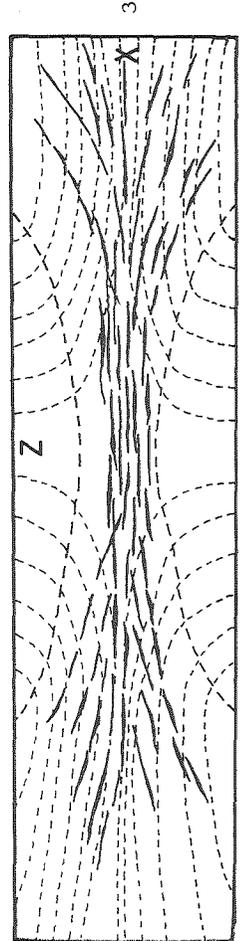
- A₁: 自然積雪円柱を $F=5 \times 10^3$ kg-wt まで定速圧縮したもの
- A₂: 自然積雪円柱を $F=10 \times 10^3$ kg-wt まで定速圧縮したもの
- B₁: 無定方位積雪円柱を $F=5 \times 10^3$ kg-wt まで定速圧縮したもの
- B₂: 無定方位積雪円柱を $F=10 \times 10^3$ kg-wt まで定速圧縮したもの
- C₁: A₁ に $F=5 \times 10^3$ kg-wt の定荷重を1時間与えたもの
- C₂: A₁ に $F=7 \times 10^3$ kg-wt の定荷重を1時間与えたもの
- D₁: 無定方位氷円柱の圧縮前のもの
- D₂: 無定方位氷円柱を $F=3 \times 10^3$ kg-wt まで定速圧縮したもの
- D₃: 既圧氷円柱を換軸圧縮の方法で $F=3 \times 10^3$ kg-wt まで定速圧縮したもの

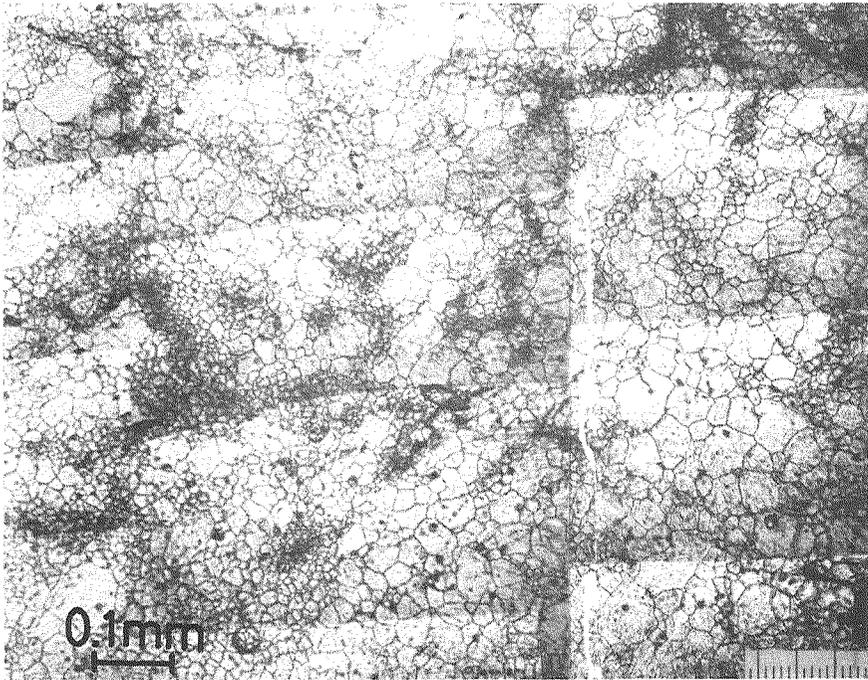
注: 薄片は圧縮方向に垂直に切ったものである。薄片の作成は圧縮実験と同じ低温室(約 -20°C)で圧縮後5時間以内に行なわれた。粒子の大きさは、この間には変化しないことを確めた



第12図 A 圧縮氷体の垂直断面 (圧縮軸に平行な断面) に見られる気泡の配列とクリベージ (剪断面) の構造

1. 気泡の配列。既圧氷柱を換軸圧縮した氷体の断面。3枚の既圧氷の版を正着して試料を作ったので、その境界面の変形が断面にあらわれている (第14図参照)
2. クリベージ。無定方位氷柱を圧縮した氷体の断面
3. 1と2とを合成した模式図





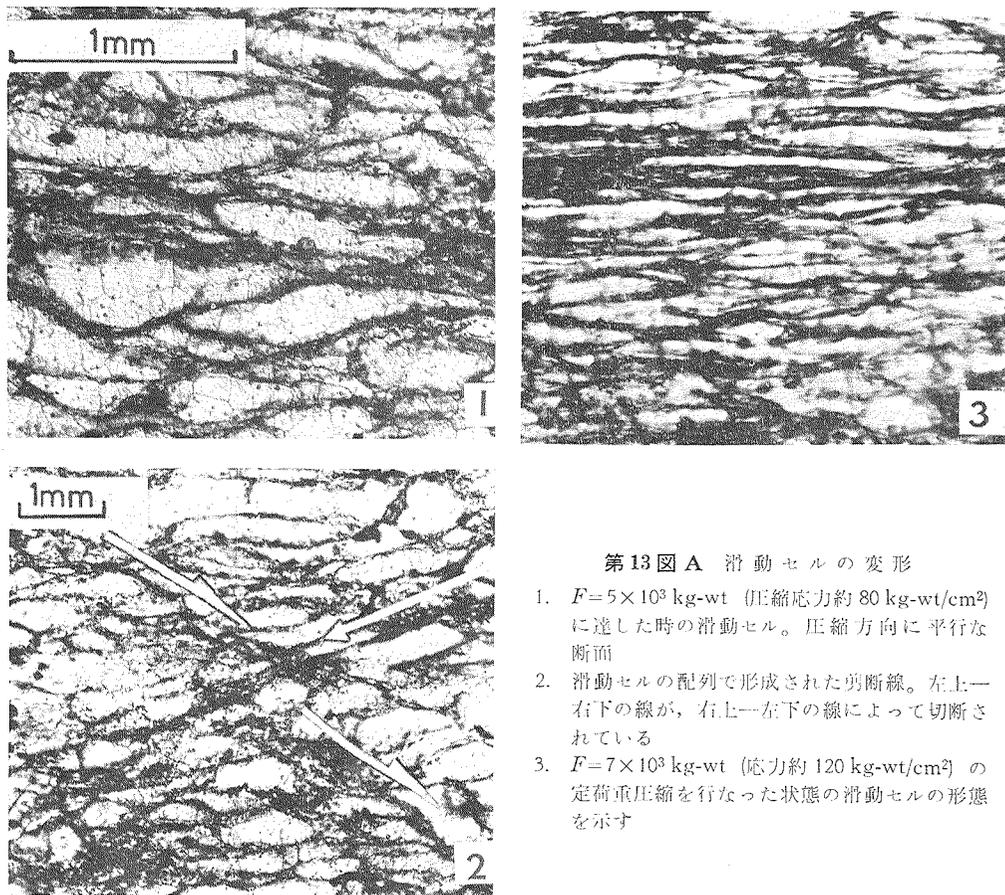
第12図B 圧縮変形した無定方位氷の水平断面 (圧縮軸に垂直)

速度の方が大きいので、蓄積された弾性エネルギーが細分化された粒子間の界面エネルギーに変わるのであろう。

圧縮氷体の中心を通して、圧縮の方向 z 軸に平行な面および垂直な面の薄片写真が第12図A, Bに示されている。これは無定方位氷円柱を圧縮変形したものであるが、これらの写真をみると、結晶粒度が様でないことがわかる。小さい結晶と大きな結晶とが入り交ることなく、帯状に連なる細粒域とそれによってとりこまれる粗粒域とに分かれている。これは蓄積された弾性エネルギーが破壊エネルギー（もし細粒化が破壊によらずれば）に変わる際、氷体全体に一樣に消費されるのではなく、局部的（帯状）に消費されることを示していると考えられる。細粒化の限界および細粒域の帯状構造は次にのべる滑動セルとも関連するので、後に再びふれる。

ii) 滑動セル

圧縮軸を含む圧縮氷体の断面 xz 面をつくり詳細にその構造を調べてみると最小構造として第13図に示したような眼状構造がみとめられる。この眼状構造は、一般に隣り合った結晶境界線の直線的ならば・気泡列・細粒結晶によってその輪郭が特徴づけられる。圧縮初期には、それらは比較的容易にみとめられるが圧縮変形が進むにつれて、不明瞭な部分ならびに全体として不明瞭な場合が生じる。眼状構造の変形を調べるために、微量（体積比で1/1000以下）のペンガラを無定方位積雪に混入し、断面構造をみるための薄片写真にしたのが第13図A1~3である。このような方法を用いると眼状構造が明瞭にあらわれる。A1は反抗力が 5×10^3 kg-wt

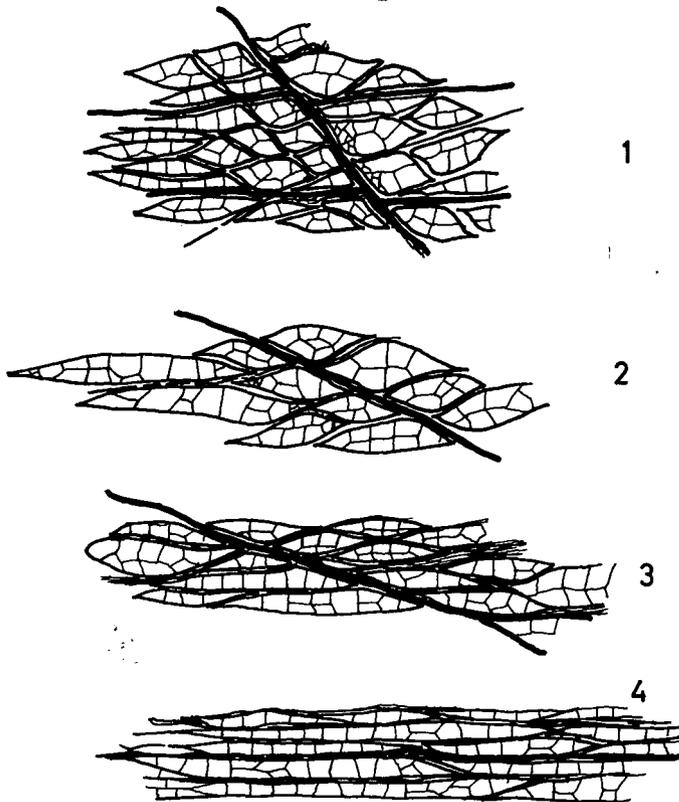


第13図 A 滑動セルの変形

1. $F=5 \times 10^3$ kg-wt (圧縮応力約 80 kg-wt/cm²) に達した時の滑動セル。圧縮方向に平行な断面
2. 滑動セルの配列で形成された剪断線。左上一右下の線が、右上一左下の線によって切断されている
3. $F=7 \times 10^3$ kg-wt (応力約 120 kg-wt/cm²) の定荷重圧縮を行なった状態の滑動セルの形態を示す

に達した状態のもの、A3は 7×10^3 kg-wtの定荷重をかけた状態のもので、両者における形は明らかに異なっている。A1をみると、1つの眼状構造の中に10粒位の結晶が含まれている。眼状構造の大きさはA1で短径が0.3~0.4 mm, 長径が1~2 mmである。A3ではそれが0.1~0.2 mm, 1.5~2 mmに変化しているが、体積には(写真の場合は面積)変化はなさそうである。この構造の内部にベンガラが全く含まれないこと、および体積変化があまりないことから、これは圧縮前に1つの結晶であったものが細粒化していく過程で数粒となり、このような構造を示していると考えられる。A2は1つの剪断面が他の剪断面によって切断されていることを示している。これら剪断面は、眼状構造が1つの線上にならぶことによって形成されており、眼状構造が圧縮水体内部の変形にとって重要な役割を果していることがわかる。第13図Bは圧縮がすすむにつれて眼状構造が次第にひきのばされていくことを示している。これらの現象や、先にのべた剪断面の形成からわかるように眼状構造は水体の流動と密接な関係があり、また、流動のときの微小単位と考えられるから、眼状構造のことを「滑動セル」とよぶことにする。滑動セルの3次元構造についてはよくわかっていない。しかし第12図Bに示した無定方位氷柱の圧縮断面(≒軸に垂直)中にみられる数個の粗粒を囲む細粒域の環状構造が、セルの水

Deformation of Gliding Cell



第13図B 1~4は滑動セルの変形の過程を示す。
黒で描かれた線は剪断面である

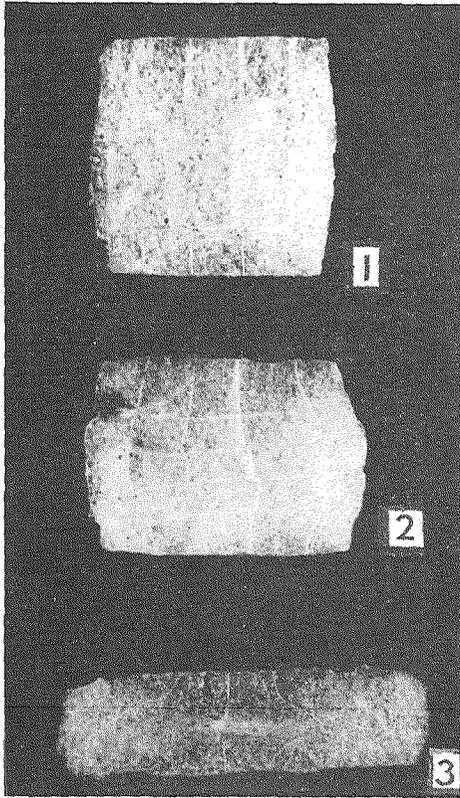
平断面に相当する可能性があり、もしそれが妥当であるとする、滑動セルは扁平楕円体のような三次元的構造をもっていると思われる。

滑動セルは内部応力の履歴によってその形が決定されるはずであるから、形の変化を観察するとその滑動セルのうけた力の状態の変化が解析されるはずである。しかし実際には、力の状態およびその変化は極めて複雑であるので容易に明らかになるわけではない。滑動セルの構造と氷の結晶主軸の定方位性および結晶細粒化の限度の存在などは密接な関係にあると考えられる。

iii) 圧縮氷体内部の変形

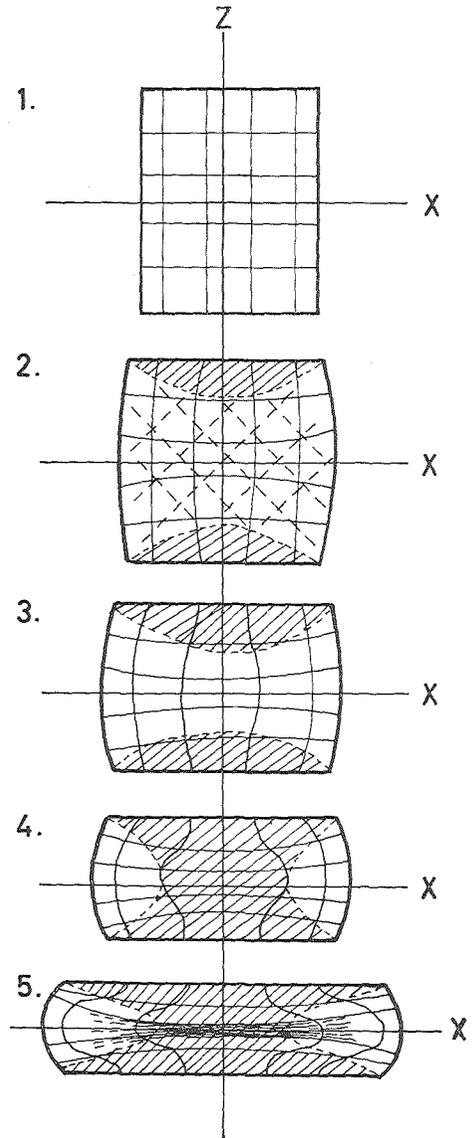
A. 碁盤目の変形・その他

圧縮変形していく雪—氷円柱内部でどのような構造的変化が生じているかを調べることは、結晶主軸の定方位性の形成機構を調べる上で重要な要素となる。弾性体の場合は、変形していく物体外部の変形から内部の応力状態・構造変化を知ることが出来るが、雪や氷のように弾性体的性質と塑性体的性質の両方をもつものはそのようなわけにはいかない。第14図A, Bは立方体状の氷塊を貼り合せて氷円柱内部に碁盤目を作り、その変形を調べたものである。こ



第14図 圧縮氷体内の変形

- A: 氷の立方体を接着して作った氷円柱の圧縮変形後の鉛直断面。接着面が断面上では線としてあらわれている (上の写真)
- B: 断面の模式図 (右の図)
 2~5に斜線で陰影をほどこした部分があるが、これは気泡の少ない透明域の拡がりを示す。5の中心部にみられる実線は第14図A3にみられるような剪断面である



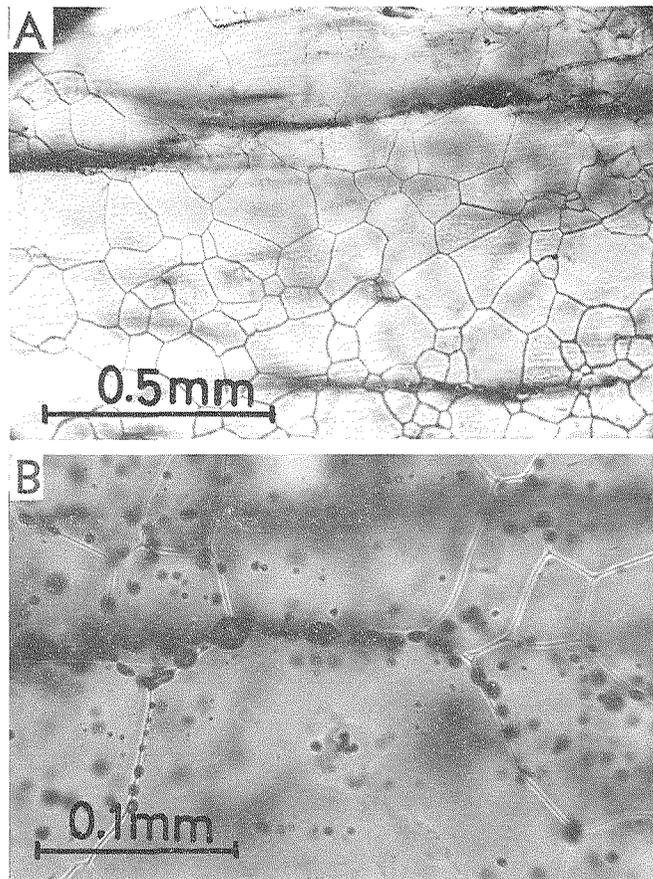
これは既圧氷柱を作る場合、貼り合わせ面が気泡の密集面としてその後の変形によっても保存されること (第12図A1) を利用して行なった。接合面は変形初期に構造的弱線として働く場合もあるが、それを無視すれば第14図Bのように変化していくと考えてよい。

第14図B1は圧縮変形前の氷柱内部を示してある。圧縮変形開始直後に予想される主応力の方向は z 軸・ x 軸に平行で、 τ_{\max} はそれに 45° 傾く。B2は実際に観察された圧縮氷体内部の構造(第14図Aの最上部の写真)で、破線で示されているのは、気泡の密集した列で強調された剪断面である。 z 軸からの角度は $45\sim 50^\circ$ である。この図は氷円柱の場合であるが、積雪円柱の場合にも密度が 0.87 g/cm^3 に達したとき、 $50\sim 60^\circ$ に傾いた1組の剪断面が観察された。

B2, B3, B4, B5 は次第に応力 σ_z が大きくなるにしたがって、氷柱内部が変化していくありさまが示されている。B5 の状態では、応力 σ_z は 60 kg-wt/cm^2 に達した。B2~B5 の図中に、斜線をほどこした部分は気泡の少ない、比較的透明な部分である。これを仮に圧密域とよぶ。これは B2, B3 にみられるような相対する 2 枚の平坦レンズ状の拡がりから B4, B5 にみられるつづみ状拡がりによっていく。この圧密域の内部を詳しく示した図が第 12 図 A で、これをみると圧密域内部では気泡列 (A3 図上では点線で示してある迂り線を示すと考えられる) は圧縮板の近くでは比較的 z 軸に平行で、圧密域からはずれると急に x 軸方向に屈曲する。また第 14 図 B3, B4, B5 および第 12 図 A3 の状態の氷柱をみると、圧密域内部には全くクリベージ (Cleavage) が存在しないことがわかる。一般にクリベージはレンズ状圧密域と塑性部との境界線に平行なものおよび圧縮板に平行なものが卓越する。第 14 図 B5 の圧縮氷体中心部の実線は明瞭に現われたクリベージを示したものである。これらクリベージは第 13 図 B2 の状態で氷柱内部に形成された剪断面がその後も剪断面として働きながら氷柱の変形とともに、その傾きを変えていったものと考えられる。その構造は滑動セルと密接な関係にある。構造上それは氷体の不連続面 (劈開) である。

B. 気泡面について

これまでのにのべたように、滑動セル・クリベージなど圧縮氷体内部の構造要素はいずれも気泡の分布・配列と密接な関係をもっている。いいかえれば、気泡は圧縮氷体内部の構造的な不連続面や剪断面などの運動面に集まり、同時にそれを助長する働きをもっていると考えられる。第 15 図 A, B はそれら空隙構造の性質・構造を調べるために撮した顕微鏡写真で A は B に比べると倍率が低い。A をみると、それら空隙構造が、結晶境界線が連らなって作る構造線と平行してならんでいることがわかる。A を含むそれより広い範囲でみると、それら空隙要素



第 15 図 氷の中の気泡

A: 気泡群の配列とその位置 B: 気泡の列 (拡大写真)

の連らなりは扁平な閉曲面であり、さきへのべた滑動セル1単位の境界をなしていることがわかる。この写真の水体にはベンガラは全く含まれていない。

BはAの4倍の倍率で撮った顕微鏡写真で、気泡の形、相互関係がよく示されている。この写真からわかるように、空隙構造は連続的な面ではなく個々に独立した球形又は楕円体形の気泡であることがわかる。

IV. 考 察

1. 定方位性について

第III節で示した実験の結果をみると、多結晶氷が圧縮変形される時、その中の結晶の主軸が定方位性をもつようになることがわかった。ここではまず実験の方法や結果について吟味し、つぎに定方位性の系列について考察する。

i) 圧縮変形前にあった定方位性が、圧縮による定方位化にどんな影響を与えるか

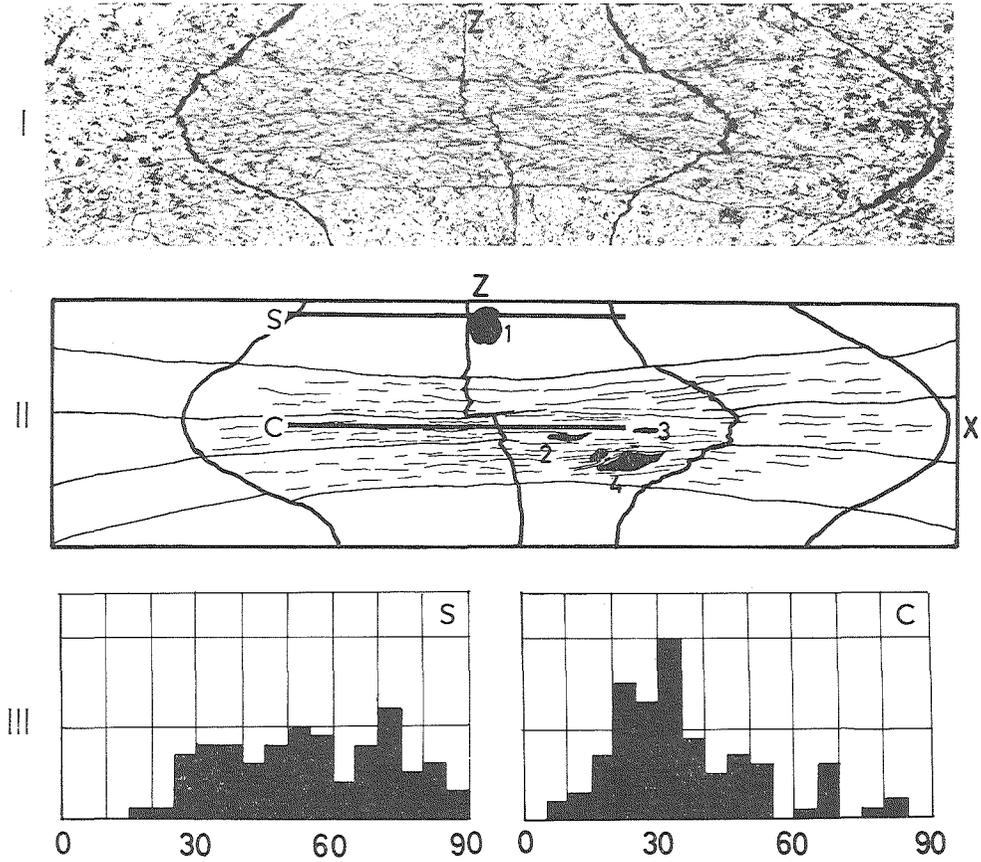
これを検討するために2種の試料を用いた。予め定方位性をもつ自然積雪円柱と全く定方位性がない無定方位積雪円柱である。これらの圧縮前の組織図表ならびに角度ヒストグラムは第5図A, Bに示されている。また自然積雪円柱を圧縮変形したときの組織図表は第6図および第7図に、無定方位積雪円柱のものは第8図に示されている。第6図, 第7図は第5図Aの面かげは全くないし、第8図は第5図Bの面かげが全くない。何れも充分な圧縮エネルギーを与えると第9図A', B'のような等しい定方位性を示す氷になる。ただしこのA'は自然積雪を、B'は無定方位積雪を圧縮したものである。

ii) この定方位性の型に一般性があるかどうか

このことを調べるために、既に定方位性をもつ既圧氷を換軸圧縮した。この結果は第10図Bに示されている。これは無定方位氷円柱を圧縮した第10図Aと同型である。充分な変形エネルギーが与えられると初期の方位性は変形後の方位に影響せず、全く同じ型の定方位性をもつことがわかる。

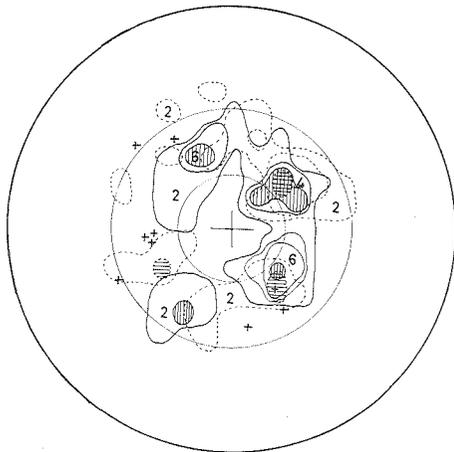
iii) 圧縮氷の中央部と圧縮板に近接する部分との比較

第III節でのべたように、積雪円柱を圧縮変形させ、反抗力が $(5\sim 10)\times 10^3$ kg-wtに達したときの圧縮氷中央部と圧縮板に近接する部分の組織図表・角度ヒストグラムを比較すると、両者には明瞭な相異は現れない。しかし圧縮がすすむとその相異は明瞭になってくる。第16図は無定方位氷円柱をひずみが0.9になるまで圧縮変形した状態での断面図である。第16図IIの薄片採取位置C・Sでとられたものの角度ヒストグラムが第16図IIIのC・Sに示されている。中央部Cからとられたものの角度ヒストグラムの山が $30\sim 35^\circ$ にあるのに対しS位置よりのものは $30\sim 80^\circ$ に広い台地を形成しており、両者は全く異なる。第16図Iや第12図Aにみられるように、中央部と圧縮板近接部では氷体構造が全く異なっている。特に、中央部ではクリページがよく発達しているのに対し、後者は全くそれがみられない。このことは定方位性形成機構とクリページ(剪断面)との間に強い関連のあることを示す。第8~10図の組織図表はすべて中央部からとった薄片によるものである。以後の定方位性に関する議論は主として



第16図 薄片採取位置による結晶主軸の配位の相異

- I. 氷の立方体を接着して作った無定形氷柱の圧縮後の断面 (圧縮方向に平行)
- II. I の模式図。図中の1~4は第18図の1~4に対応する
- III. 左図 S および右図 C は II 図中の S, C で示された部分の角度ヒストグラム



第17図 同一薄片内に混在する粗粒結晶と細粒結晶の組織図表

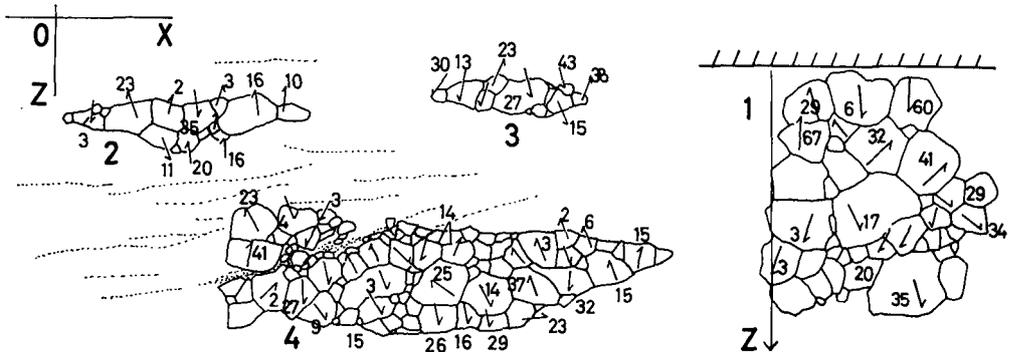
実線は細粒結晶の結晶主軸の分布を、点線は粗粒結晶の結晶主軸の分布を示す。+印は更に大きな粒子の結晶方位を示す。縦線、横線でほどこした陰影は、それぞれの極大の位置を示す

粒度の区別は例えば第12図Bからわかるように粗粒域と、それを囲む細粒群とを区別した。細粒の粒径は0.2mm程度、粗粒は0.4mm程度である

この中央部について行なう。

iv) 細粒と粗粒との比較

第12図B(第11図D₂に相当)にみられるように、圧縮水体内部の結晶の大きさは一様ではない。これら細粒の結晶と粗粒の結晶の主軸方向に相違があるかどうかを調べたものが第17図である。実線は細粒、点線は粗粒、+印は特に大きな結晶の方向を示したものである。組織図表中、両者が示す主軸分布の型はいく分異なっているが、分布の山は、ほぼ同じ円環帯に乗っている。2%域の分布をみると細粒結晶の方が極大への集中をいく分すすめている。第6~10図に示された組織図表は、薄片上に固定した走査線上にのるすべての結晶を測定して作製したものであるから、第17図にみられるような細粒・粗粒の主軸方向分布(型)を区別せずに合成したものである。



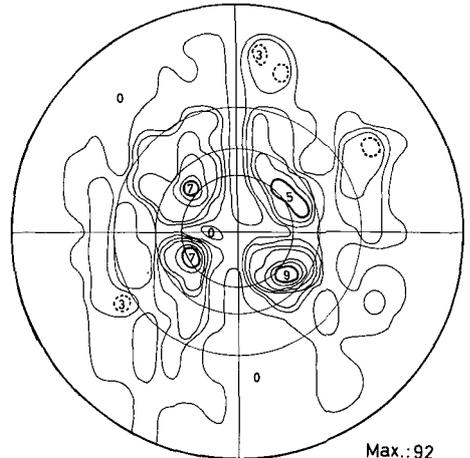
第18図 小結晶の結晶主軸の方位の分布
滑動セル内の小結晶の主軸の方位が矢印と紙面からの仰角をあらわす数字とで示されている。試料中の位置は第16図に示す

v) 隣接粒子間の方位関係

これまでは結晶方位を統計的に取扱ってきたが隣り合った結晶粒子間に規則性はないだろうか。第18図は個々の結晶の主軸方向を示したものである。測定は3つの滑動セルと圧縮板近接部とについてなされた。これらの採集位置は第16図IIに示されている。この図から、結晶相互の主軸方向の関係がわかる。一般に隣り合った結晶の傾きが平行しているものが多い。しかし滑動セルの先端部や剪断面に近接するものには当てはまらない。圧縮板に近接した部分の結晶群1では2・3・4にみられるような関係はなく、傾きの方向に秩序がみられない。

vi) 単軸圧縮氷の最終方位

各組織図表のパターンの間にどのような共



第19図 極大域の分布

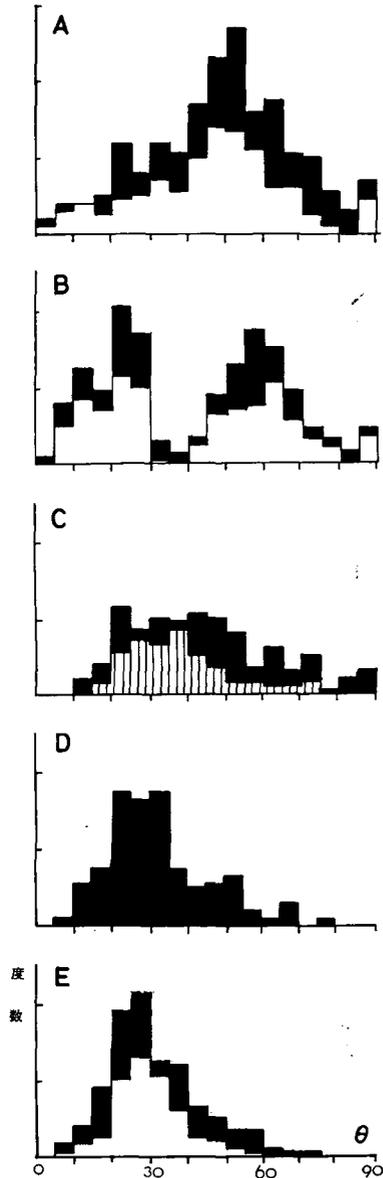
第6~10図の組織図表にあらわされている極大域の中心点について分布を調べた図である。使用された極大または亜極大の数は92点である

通要素があるか調べるために作製した図が第19図である。雪一氷円柱の圧縮の場合、圧縮変形された氷体の組織図表は圧縮軸のまわりにはどの方向も同等であるはずであるから個々の組織図表を相互に比較するためには、何かを基準にせねばならない。極大域を基準にする方法もあるが、反抗力が 5×10^3 kg-wt程度の場合には亜極大がいくつも現れ、そのうちのどれが基準として適当であるかを決定する方法がない。しかし組織図表を詳しくみると、多くの場合、図表の中心部には谷間(低集中域)が入りこんでいる。これが何を意味するかはわかっていないが、これを図表の相互比較の基準とすると、大変都合が良い。谷間を基準にして各図を重ね合せ、極大又は亜極大の中心位置を点としてシュミットネットに投影し、その集中分布図(第19図)を作った。これに使用した極大、亜極大は92個で、その半分ずつが低集中域の谷間を境にした両側に記入された。(正確には48個と44個である)。第19図をみると4つのほぼ等しい極大が圧縮軸 \approx 軸に関してほぼ 90° ずつへだたって現われている。氷河水にみられるダイヤモンド・パターンといわれるものは、第19図のように4つの極大が正方形にはならず、ひし形をなす。正方形の4極大と氷河水の4極大との間にどのような関係があるかはいまのところわからない。

2. 予想される定方位化の過程

密度の小さい積雪円柱が圧縮されるとき、ある一定密度に達するまでは積雪円柱内部で粒子相互の曲げ破壊や、破片粒子の移動による空隙充填が進行するので、粒子内での底面回りや粒界移動が多少はあるとしても定方位化の起こる可能性は比較的小さい。おそらく定方位化が起こるのは圧密が進んで密度が 0.6 g/cm^3 以上になってからで、本格的に定方位化が進むのは密度が 0.8 g/cm^3 程度つまり、氷になってからであろう。

定方位化を推進させる原因を探るために、まず第6, 7, 8, 10, 9図の角度ヒストグラムを各図毎にまとめ、つまり各経歴毎にまとめてA, B, C, D, Eとして



第20図 角度ヒストグラムにみられる定方位化の系列

横軸は圧縮方向 \approx 軸からの角度 θ , 縦軸は度数を表わす

A, B, C, D, Eはそれぞれ第6, 7, 8, 10, 9図の結果の集計である。A, Bの白抜き部は圧縮板に接した部分のもの。Cの黒色部は無定方位積雪円柱を $F=5 \times 10^3$ kg-wtまで圧縮したもの、他は $F=10 \times 10^3$ kg-wtまで圧縮したもの。Eの白抜き部は第9図Bに等しい

並べたのが第 20 図である。ここには A から E への 1 つの系列がみられる。A では山が $\theta_1 = 45 \sim 55^\circ$ にあるが、最後の E には山が $\theta_2 = 25 \sim 30^\circ$ にある。B は過渡状態として θ_1, θ_2 の 2 つの山がみられる。この系列と、これ等を生じた圧縮条件とを考え合わせると、定方位化に寄与するものは積雪が圧縮されて氷になった後、氷の単位体積に与えられた圧縮エネルギー、または圧縮作用量 (= 圧縮エネルギー \times 圧縮時間) であろう。この分析をするには正確な応力-ひずみ曲線や応力と時間との関係が必要である。

3. 定方位性の形成機構について

氷河水にみられる定方位性現象の形成機構に関する議論は、その初期には主として氷のすべり面に関する議論であった。しかし氷の物性的研究が進むにつれて、形成機構の問題は単にすべり面だけで片づけられなくなってきた。筆者の実験は、実存の氷河水の場合とくらべると変形速度・変形に関与する応力などすべて異なる。したがってここではこの実験条件内での定方位性についてのみ若干の考察をする。

この実験の場合、雪-氷円柱の変形の機構は、雪の状態での変形と、氷の状態での変形とに大別される。

i) 雪の変形の場合、木下が報告しているように、密度が 0.6 g/cm^3 程度になるまでは、氷粒の底面すべり・融合・粒界移動・細胞化などが起こり、これらは密度の増加に寄与する。

ii) 氷の変形の場合、物性的に 2 つの面からその変形の機構を考えねばならない。1 つは (a) 単結晶の物性、主として転位を起し得る結晶面とそれに要する力、他の 1 つは (b) 三次元的多結晶群としての物性、例えばこの実験で観察された剪断面や滑動セル、細粒化およびそれに限界のあること、などである。(a) については、多くの人によって研究され、例えば若浜¹⁵⁾ は二次元的多結晶をはやい歪速度で変形させた場合、低い次数の錐面、例えば $(10\bar{1}1)$ や $(11\bar{2}2)$ および柱面 $(10\bar{1}0)$ などに沿う破壊面が生じることを確かめ、柱面の場合その臨界剪断応力の大きさとして約 7 kg-wt/cm^2 を得ている。これは底面のそれ 0.2 kg-wt/cm^2 の 35 倍の大きさである。これらの実験結果から氷の底面 (0001) 以外にいくつかのすべり面が存在することはまちがいのない事実とあってよからう。野外観測においても、木崎²⁾ は南極の海水 (これは急激な変形をうける) の組織を解析し、柱面すべりの可能性をのべている。この実験の場合、例えば圧縮の中心 O 付近で 1 つの滑動セルが受ける応力を見積ると、反抗力 F が $10 \times 10^3 \text{ kg-wt}$ に達したときの応力は、圧縮板隣接部で 150 kg-wt/cm^2 程度であるから、1 つの滑動セルの圧縮方向に垂直な面積 1 mm^2 (数個の結晶を含む) には 1.5 kg-wt/mm^2 の応力が働いている。その最大剪断応力 τ_{\max} はその 1/2, 750 g/mm^2 程度 (又はそれ以下) であるが、これは底面すべりの臨界剪断応力の約 350 倍、柱面のその約 10 倍の値である。したがって反抗力 F がこの程度になったとき (その 1/10 以上であればよい) には、すべての可能なすべり面が可動状態にあると考えてもよからう。このことは定方位性形成機構の解析を複雑にするが、底面すべりだけに頼らなくてもよいことになった。

氷の変形の場合の他の 1 つの物性現象 (b) は、いいかえれば氷の結晶群が 1 つの塊としてあらかず物性である。これをどのように捉えるかについては、氷の場合ほとんど報告が見当ら

ない。この実験の場合、第 II 節でのべたように、圧縮氷体の結晶群の最小変形単位は滑動セルである。すでに示したように滑動セルは圧縮の進行とともに変形する。同時に、剪断面は圧縮セルのすべり面として働いていることも示した。結晶の細粒化は第 11 図の粒度分布に示されているが、細粒化はこの実験範囲では $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ より小さくなることはなかった。このことは、滑動セルが無限に小さくなり得ないこと、すなわち滑動セルの厚さが $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ に達した状態では結晶が塑性変形を起こし得ない状態になることを意味する。つまりある限界をこすと滑動セルは滑動セル内部の結晶粒の塑性変形によって変形エネルギーを緩和するより、弾性体或いは剛体としてふるまい、例えば滑動セル相互のすべり等によって変形エネルギーを消費するようになる。滑動セルのそのような最終段階に至る前の諸段階で個々の結晶が限りなく塑性変形することなく、常にある限界に止められることは、滑動セルの大きさ、内部構造がほぼ等しいことなどから推定される。このような状態での余剰エネルギーは第 13 図 A 2 に示されている滑動セルを分断する剪断面の形成のようないわば機械的変形によって費やされるのである。

いままでのべた雪・氷の変形型式と、前項 2 にのべた θ_1, θ_2 のような集中角度の形成機構との関連については、まだ明らかにすることはできない。この問題は、変形の最小単位である滑動セルの物性的性質および変形諸段階におけるその内部の応力状態の理解とともに明らかにされていくものと思われる。

V. ま と め

氷河氷にみられる結晶主軸の定方位性の形成機構を明らかにするため、まず実験室内で雪一氷円柱を圧縮変形した場合どのような定方位性が結晶主軸のならびにみられるかについて実験を行なった。実験は 4 種の試料 (自然積雪・無定方位積雪・既圧氷・無定方位氷) について 3 つの方法 (定ひずみ速度圧縮・定荷重圧縮・換軸圧縮) を、力の大きさを変えて行ない次のような結果を得た。

- (1) 雪一氷円柱を圧縮すると、結晶軸の方位が、圧縮軸とある一定の角度をもつ傾向がみられる。その定角度は 2 つあり、その 1 つ θ_1 は $45\sim 55^\circ$ であり、もう 1 つ θ_2 は $25\sim 30^\circ$ である。試料により θ_1, θ_2 だけのもの、 θ_1 と θ_2 と両方をもつものがある。
- (2) θ_1 も θ_2 圧縮前に試料が持っていた方位と無関係である。
- (3) 試料が氷になってから受けた変形エネルギーまたは変形作用量 [(変形エネルギー)×(変形時間)] の大小が定角度への集中度の大小をきめるらしい。変形作用量が大きいときには θ_2 に集中するが、小さいときには積雪から圧縮した氷では θ_1 に集中するため、中間の大きさでは θ_1 と θ_2 とに山があらわれる。
- (4) 1 つの試料中にある小結晶の粗粒と細粒とを別々に統計してみたが、定方位性の差はほとんど認められない。細粒の方がわずかに角度が小さいようにみえる。
- (5) 試料中の小結晶の粒径分布をみると、その下限は $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ である。この実験で圧縮が進んで非圧縮性流動の起こる最終的な段階に達しても、小結晶の粒径は 0.1 ないし 0.2 mm に

集中するだけで、分布の山はそれより小さい粒径に移らない。 θ_2 はこのような最終段階の圧縮までも含む実験で得られた値であるから、この値以外の新しい集中角度は現れないであろう。

(6) シュミット・ネットの中心を圧縮方向にとって小結晶の C 軸方向を投影した組織図表を重ねて見ると、4つの極大が中心から θ_2 の角度だけ離れた円周上にほぼ等間隔に並ぶ。つまり4つの象限に1つずつ極大が位置する。実験の仕方から考えれば圧縮方向に垂直な方向はすべて同等であるから、極大域は1つの円形になる筈であるのに4つの極大が生じた理由はよくわからない。これと氷河水にみられるダイヤモンド・パターンとは何等かの関係があるように思われる。

(7) C 軸の定方位化の機構について調べるため、外部変形に伴う内部組織の変形を詳しく調べた。その結果、定方位化の機構そのものを説明できるまで解明されたわけではないが、剪断面・滑動セル等の変形が定方位化と密接な関係を持っている事がわかった。

おわりにのぞみ、この研究に対し深い関心と討議を下された北大低温科学研究所の諸氏ならびに北大理学部地球物理学教室の諸氏に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) Rigsby, G. P. 1960 Crystal orientation in glacier and in experimentally deformed ice. *J. Glaciol.*, **3**, No. 27, 589-606.
- 2) Kizaki, K. 1962 Icefabric studies on Hamna Ice Fall and Honhörbrygga Glacier, Antarctica. 南極資料, 第 **16** 号, 54-74 (和文要旨付).
- 3) 東 晃・橋本誠二 1961 メンデンホール氷河調査. 自然, 2月号, 24-32; 自然, 3月号, 42-52.
- 4) Rigsby, G. P. 1951 Crystal fabric studies on Emmons Glacier Mount Rainier, Washington. *J. Geol.*, **59**, 590-598.
- 5) Kamb, W. B. 1959 Ice petrofabric observations from Blue Glacier, Washington, in relation to theory and experiment. *J. Geophys. Res.*, **64**, 1891-1909.
- 6) MacDonald, G. F. 1960 Orientation of anisotropic minerals in a stress field. In Rock Deformation (D. Griggs and J. Handin, eds.), Chapter 1, *Geol. Soc. Amer. Memoir.*, **79**, 1-8.
- 7) Brace, W. F. 1960 Orientation of anisotropic minerals in a stress field: Discussion. In Rock Deformation (D. Griggs and J. Handin, eds.), Chapter 2, *Geol. Soc. Amer. Memoir.*, **79**, 9-20.
- 8) Nakaya, U. 1958 Mechanical properties of single crystals of ice. *SIPRE Res. Rept.*, **28**, 1-44.
- 9) 若浜五郎 1962 氷の塑性変形について I~IV. 低温科学, 物理篇, **20**, 57-130.
- 10) 木下誠一 1962 塑性圧縮による積雪の氷への転化. 低温科学, 物理篇, **20**, 131-157.
- 11) 坪井誠太郎 1959 偏光顕微鏡. 岩波書店, 東京, 297 pp.
- 12) Langway, C. E. 1958 Ice fabrics and the universal stage. *SIPRE Tech. Rept.*, **62**, 1-16.
- 13) 木崎甲子郎 1964 構造氷河学の方法. 地質学雑誌, 第 **70** 卷, 第 823 号, 214-225.
- 14) 大浦浩文・小林大二 1966 積雪の粒度分布の求め方について. 低温科学, 物理篇, **24**, 139-157.
- 15) 若浜五郎 1965 氷の内部破壊について. 低温科学, 物理篇, **23**, 39-50.

Summary

It is a well known fact that the grains in glacier ice have one or several preferred orientations. To clarify the process of formation of such orientations, some experimental studies in a cold room were carried out. Four kinds of snow and ice, namely, natural deposited snow with preferred orientation, artificial deposited snow without preferred orientation, the ice with preferred orientation, and ice without preferred orientation, were compressed into ice.

The ice with the preferred orientation was prepared by preliminary compression perpendicular to the direction of the compression test. Two ways of compression, namely, compression of constant speed and constant load were used. Test pieces were cylindrical in shape. The initial size of a snow cylinder was 5 cm in diameter and 10 cm in height and the ice cylinder was 3 cm in diameter and 5 cm in height. The load F on the test piece was raised to 5×10^3 kg-wt or 10×10^3 kg-wt with a lapse of 3 hours and for some pieces the load was kept at the last value for an additional hour.

The ice thus obtained was investigated.

The inclination θ of the c -axis of each grain from the axis of compression z , and the azimuth of the c -axis were estimated by a universal stage and a microscope in cross polaroid, and these were plotted on Schmidt's net (ice fabric diagram) and on a histogram of frequency-inclination relation.

Figures 6 and 7, and Figs. 21 A and B indicate the orientation of ice made from natural deposited snow, Fig. 8 and Fig. 21 C indicate that from artificial snow with non-preferred orientation, Fig. 10 A indicates that from ice without preferred orientation and Fig. 10 B and 21 E indicate that from preliminary compressed ice, Fig. 9 A, 9 B and 21 D indicate that compressed with a constant load. Figure 9 A is for natural snow and Fig. 9 B is for snow with non-preferred orientation.

The results obtained are summarized as follows: —

- (1) The orientation of snow and ice before compression does not affect the orientation of ice obtained by sufficient compression.
- (2) There seems to be two preferred orientations $\theta_1 = 45 \sim 55^\circ$ and $\theta_2 = 25 \sim 30^\circ$. In the final stage of the compression, however, only θ_2 remains.

With the increase of the energy consumed by a unit volume of ice in compression multiplied by time duration of compression, the pattern of the histogram seems to change from A to E in Fig. 21.

- (3) The validity of the value of θ_2 was confirmed by the compression of ice perpendicular to the preliminary compression (Figs. 9 B and 10 B).
- (4) At the final stage of compression, the fabric diagram of the ice Fig. 19 shows four maxima patterns which resemble the diamond pattern of glacier ice.

Figure 19 is a fabric diagram which shows the accumulation of only the maximum points in each diagram of Figs. 6-10, which was obtained by laying the central trough of each diagram on the same line.

- (5) According to the grain size distribution shown in Fig. 11, the minimum grain size in compressed ice is limited to 0.1~0.2 mm. Therefore, the plastic deformation of

single crystals may not occur after all grains attain their minimum size.

- (6) The internal structures of deformed ice is closely connected with the formation of preferred orientation. The gliding cell (eye shaped structure) and the shearing plane found by microscopic observation seem to be the most important structures related with preferred orientations of crystals. The gliding cell behaves as a unit body with elasto-plastic property, in the deformation of ice body. These internal structures are shown in Figs. 12, 13, 14 and 15. Figure 12 shows the vertical and horizontal section of compressed ice, and the cleavages in it. Figure 12 A 1 shows the result of compression of 3 ice plates stuck together vertically and gives the bent boundary at the central part. Figure 13 shows the gliding cell and shear plane, Fig. 14 shows the change of shape and appearance of ice in the process of compression. Many pieces of small cubic ice stuck together make a test body, which has the check pattern on it. Figure 15 shows lines of air bubbles appearing on the grain boundary, parallel to the shear plane.
- (7) Figure 16 shows the vertical section of ice made of 6 vertical ice plates stuck together and the histograms of tilt angle θ of c -axis for a sample at the center (C) and at the compression side (S). The difference between C and S can be seen.
- (8) Figure 17 shows the difference of preferred orientation between the groups of different grain size, small grain (solid line), large grain (dotted line) and huge grain (cross mark). It seems that the c -axis of the smaller grain is closer to the axis of compression (center of the circle).
- (9) On a horizontal section of compressed ice, the orientation of grains in a gliding cell are almost parallel, but it can not be extended to the grains around the cell. Figure 18 shows this. The numbers 1, 2, 3 and 4 attached to each gliding cell correspond to the same number in Fig. 16 II.