HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | 多結晶氷の歪と結晶成長 |
| Author(s) | 水野, 悠紀子 |
| Citation | 低温科學. 物理篇, 48, 1-12 |
| Issue Date | 1990-03-12 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/18579 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 48_p1-12.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Yukiko MIZUNO 1989 Crystal Growth in Deformed Polycrystalline Ice during Stress Relaxation. *Low Temperature Science, Ser. A, 48.* (With English Summary p. 11)

# 多結晶氷の歪と結晶成長*

水野悠紀子
(低温科学研究所)

(平成元年11月受理)

## I. はじめに

氷河や氷床を構成している多結晶氷の組織（粒径，粒形，結晶主軸方位分布）は，積雪が圧密氷化した後，さまざまな応力の下で繰り返された流動や再結晶の歴史を刻み込んでいる。氷河氷の結晶主軸分布は多くの場合特定の方向に集中している。このような選択方位配向は，流動とそれに伴う再結晶過程の結果である。このため，実際の氷河で観察されるいくつかの選択方位配向を実験的に再現することによって，選択方位配向の形成機構や，応力との関係を明らかにするために多くの研究がおこなわれてきた[1~4]。それによって，選択方位配向を実験的に再現するという点に限れば，氷河で観察された特徴的な選択方位配向のほとんどを，種々の実験で再現することに成功したということができる。

我々は温暖氷河深部での流動を想定して数10 MPaの静水圧下での多結晶氷のクリープを行い，歪と再結晶核の発生，成長，流動などの関係を明らかにした[5]。クリープ変形に伴う第一段階の再結晶核は歪が1~2%の定常クリープ領域で発生した。

適当な歪を与えた後，応力を除去すると試料内に蓄えられた歪エネルギーを駆動力として新しい結晶粒が成長する。これは粒界エネルギーを駆動力として隣接する結晶粒を侵食していく結晶粒成長 (grain growth) と区別して再結晶による結晶成長といわれる。再結晶の場合には臨界歪を越えると結晶核が生じこれが成長するために母相とは全く異なる組織になる。金属加工の分野では歪焼鈍として利用されている手法が氷河や氷床では絶えず繰り返されているということができる。東[6]らは氷河の巨大単結晶の産出地帯が圧縮から引張応力に変わる地域に対応していることから巨大単結晶は歪焼鈍の過程で成長することを示唆した。

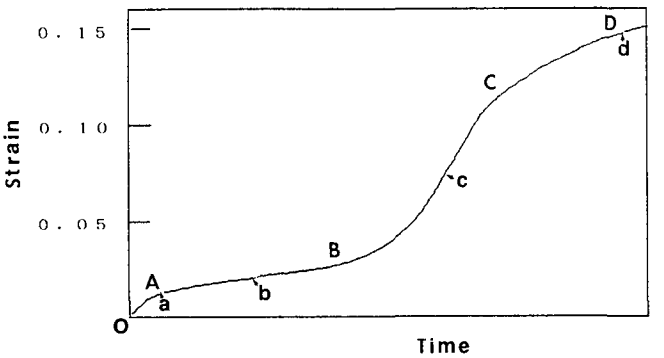
温暖氷河内や氷河底面では相当温度 (homologous temperature) が0.9以上にもなり，応力状態も場所により複雑に変化するため，氷体内での再結晶は流動の結果でもあり，あらたな流動の原因にもなる。このように応力下での再結晶過程がその後の変形と密接な関係にあることはいうまでもない。同時に応力除去後の再結晶粒の成長を調べることは歪エネルギーの緩和過程における組織形成ばかりでなく，応力状態の変化に伴う多結晶体の組織形成を知る上で重要である。本報告はクリープ変形によって予め所定の歪を与えた多結晶氷の応力緩和過程における組織変化を初期歪との関係で調べたものである。

* 北海道大学低温科学研究所業績　第3309号

## II. 実　　験

−10±0.5°C の温度で，30 MPa の静水圧をかけながら人工多結晶氷の一軸圧縮クリープ実験を行い，所定の歪に達したところで静水圧と偏差応力の両方を除去した。同温度で試料を保存し，経過時間ごとに試料の一部から薄片を作り，組織の観察を行った。変形前の試料は直径 40 mm，長さ 60～80 mm の円柱状の氷である。人工多結晶氷の作り方，クリープ実験方法は先に報告した通りである[5]。今回の実験においても人工多結晶氷に予め数 10 MPa の静水圧をおよそ 50 時間かけて粒径を揃え，また気泡を除去してある。

定常クリープ速度が $10^{-7}$～$10^{-6}$/s になるような偏差応力（1～3 MPa）を与えて一軸圧縮クリープ実験を行ったとき，歪領域 15% までの範囲でのクリープ（歪—時間）曲線は模式的に第 1 図のようになる。OA, AB, BC, CD はそれぞれ遷移，定常，加速，減速のクリープ領域を示す。それぞれのクリープ領域に対応する歪は応力によらず，ほぼ一定で歪を $e$ で表すと，OA: $e<1\%$，AB: $1\% \leqq e < 2.5\%$，BC: $3\% < e < 10\%$，CD: $e \geqq 10\%$ となる[5]。そこで我々は第 1 図の a～d で示したそれぞれの歪までクリープ変形することにより初期歪の異なる試料を得た。a～d 点はそれぞれはクリープ変形に於ける特徴的な歪に相当する。




**第 1 図**　破壊を伴わない程度の荷重で歪 15% まで圧縮変形した時のクリープ曲線の模式図
OA: 遷移クリープ，AB: 定常クリープ，
BC: 加速クリープ，CD: 減速クリープ

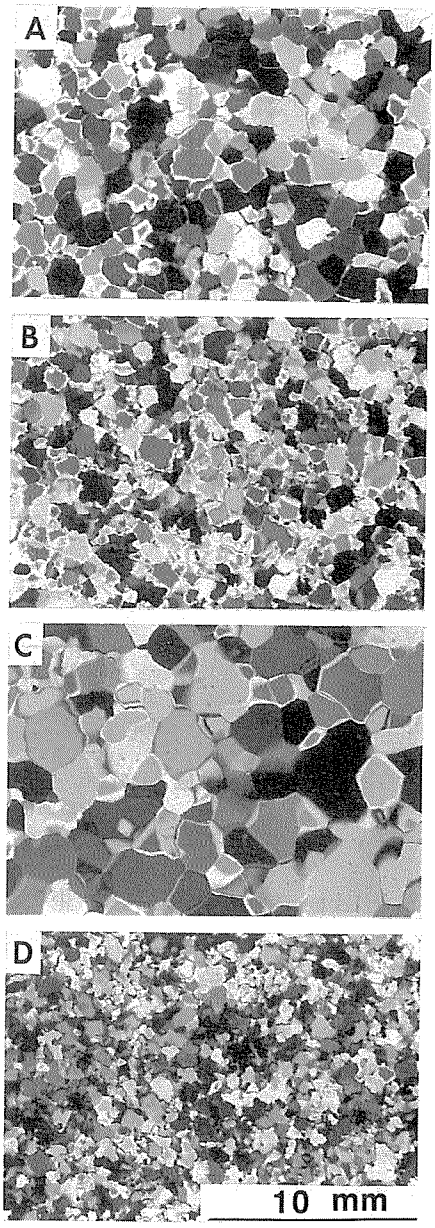
a 点は歪が 1% で遷移から定常クリープへの移行点，b は歪がおよそ 2% で定常クリープの終盤にあたる。ċ は 7.5% の歪で加速クリープ領域の中でも特に変形の加速度が最大になるところであり，d は減速クリープ領域である。それぞれの試料は初期歪が異なるばかりでなく，それにともなって組織にも顕著な差がみられる。クリープ実験のあと，直ちに初期歪状態の組織観察のために薄片をつくり，残りの試料は恒温箱内（−10±0.5°C）で保存した。静水圧下で一軸圧縮変形をすると，大気圧下での変形とは異なり，試料全体が均一に変形するので経過時間ごとに保存試料の一部から新しい薄片を作った。

特定の結晶粒の成長，消滅を追跡するためには同一の薄片試料を使って経過観察するのが一般的な方法であるが，1 mm 以下の薄い試料内では，結晶粒の成長の様子は三次元的に十分な広がりのある試料内でのそれとは大きく異なった。従って，我々は特定の結晶粒の追跡はできないが，平均的な結晶粒成長の過程を調べるために経過時間毎に新しい薄片を作り，結晶粒径，粒界の状態（直線性，再結晶の有無）などをしらべ，また再結晶粒の主軸方位分布を X 線 Laue 法できめた。

## III. 結　　果

### a. 初期歪と結晶組織

静水圧 35 MPa，偏差応力 1.5 MPa で一軸圧縮クリープを行って作った初期歪 1%，1.9%，7.5%，14.5% の試料の薄片写真をそれぞれ第 2 図 A, B, C, D に示した。第 2 図 A は歪 1% の薄片で，定常クリープ開始直後であるから個々の結晶粒の大きさや方位はクリープ変形前のものとあまり違わない。しかし，薄片写真で粒界に着目すると全結晶粒界の約半分がすでに屈曲したり，不鮮明な広がりを持つ境界へと変化しており，その中のところどころには既に微細な結晶粒が認められる。第 2 図 B は歪 1.9% の試料の結晶組織である。これは定常クリープ領域のほぼ終盤の状態である。この段階になると結晶粒界のほとんど全てが屈曲し，結晶粒界は不明瞭な太い境界域で占められる。さらに，粒界の多くの部分に小結晶粒が発生している。第 2 図 C は歪 7.5% の加速クリープ領域まで変形した試料の薄片であるが，結晶粒径はクリープ変形前の数倍になっている。このことは変形の過程で結晶粒が成長したことを示している。これに対して D に示した 14.5% の減速クリープ領域の歪を与えた試料の薄片では，結晶粒が再び細分化され，結晶粒界も複雑に屈曲しているのがわかる。

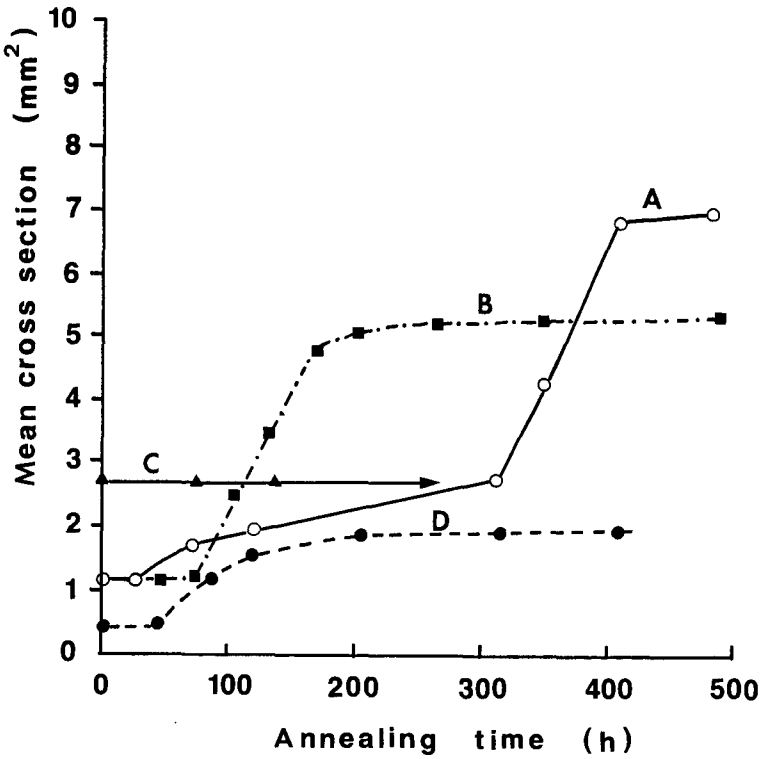



**第 2 図**　圧縮クリープ変形による歪と結晶組織

A : $e$=1%, B : $e$=1.9%, C : $e$=7.5%, D : $e$=14.5%

### b. 歪と結晶粒の成長

第 3 図には初期歪の異なる四種類の試料について，応力を除去してからの時間と，薄片写真から求めた平均結晶断面積との関係を示した。平均結晶断面積は薄片写真の一定面積 (688 mm$^2$) を結晶粒の数で割った値である。曲線 A, B, C, D はそれぞれ初期歪が 1%，1.9%，7.5% 14.5% の試料内での結晶粒成長の様子を示す。曲線 A, B の歪は先にも述べたように，それぞれ定常クリープの初期と終盤の状態に対応する。これらの初期歪の結晶組織は第 2 図 A, B の薄片写真から明らかなように，結晶粒界の形状や粒界で発生する再結晶の数には差があるが，多結晶体を構成している個々の結晶粒の大きさについては薄片観察によって認められるような違いはなかった。このため応力除去直後 (時間 0) の平均結晶断面積は両方




**第3図** 初期歪 ($e$) の異なる試料の応力除去後の経過時間と再結晶粒の平均断面積

A: $e$=1%, B: $e$=1.9%, C: $e$=7.5%, D: 14.5=%

とも 1.1 mm² である。しかし，歪 7.5% の曲線 C では初期歪を与えるためのクリープ変形の過程で既に結晶粒が成長したため，初期状態で結晶粒の平均断面積は 2.75 mm² となった。一方，歪 14.5% の試料では応力除去直後の平均断面積は 0.5 mm² 以下でクリープ変形前の半分以下であった。第3図から明らかなように，曲線 C を除いて A, B, D はいずれも応力除去後の経過時間とともに結晶粒径は増大している。しかし，増大の様子は曲線 A と B, D とでは異なる。経過時間毎の薄片観察から A の成長を不均一成長，B, D を均一成長とよぶことにする。均一成長は全ての結晶粒が平均して成長するため，経過時間毎の結晶粒径は均一化されている。

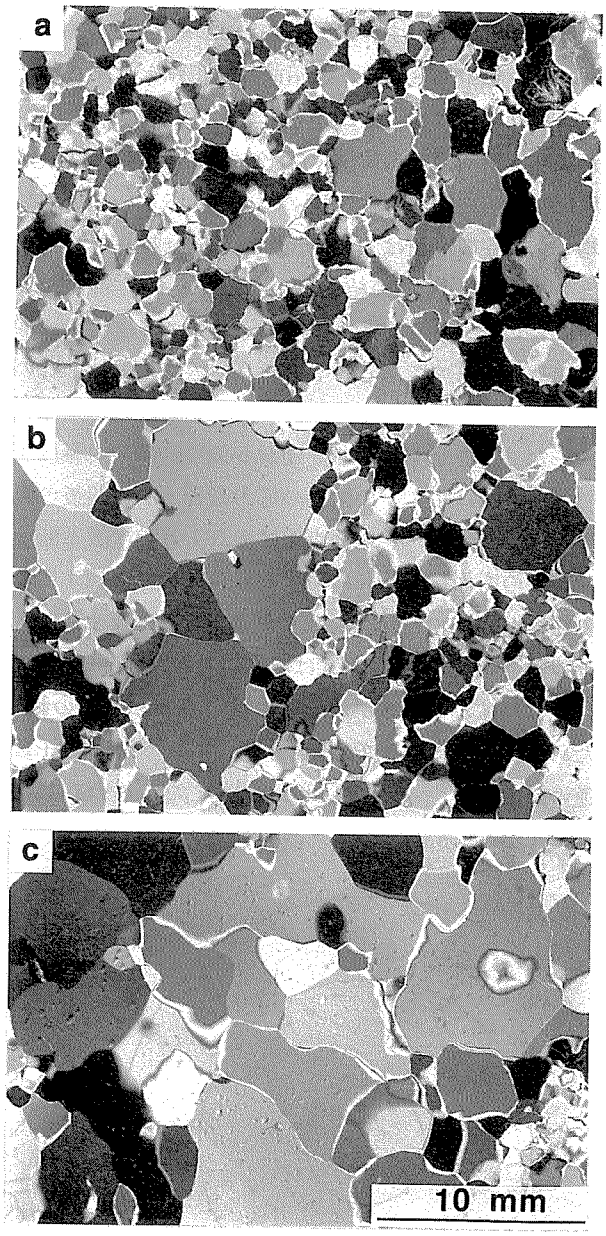
第4図は不均一成長をした曲線 A の試料の薄片の写真である。a, b, c はそれぞれ応力を除去してから 72 時間，312 時間，408 時間後のものである。時間の経過にともなって平均結晶断面積は当然増大するが，どの結晶粒も均一に成長するわけではない。例えば a の写真は 72 時間までにいくつかの結晶は急速に成長したがほとんど変化していない部分があることも示している。さらに b, c の薄片写真をみると，先に成長した結晶粒も成長を続けるが，他の部分で新たな結晶粒の急速成長がみられる。この様な過程を経て結晶粒径は時間とともに均一化の方向に向かう。しかし，均一成長に比べて粒径分布は広がりを持つ。均一成長も不均一成長も時間が経つと成長速度が鈍化して平均結晶断面積は飽和に達する。均一成長の場合は 150～200

時間で成長は完了するが不均一成長では約400時間を要した。

歪7.5%の試料では応力を除去した後の結晶粒の変化はみられなかった。

成長完了時の平均結晶断面積は初期歪1%の試料(A)で7 mm², 1.9%の試料(B)で5.3 mm², 7.5%(C)で2.8 mm², 14.5%(D)で約2 mm²であった。ただし，初期歪の状態で試料ごとの粒径が異なるから最終的な平均結晶断面積と初期値との比を成長率($G$)として，それぞれの試料について求めると，$G$(A)=6.4, $G$(B)=4.8, $G$(C)=1, $G$(D)=2.3となる。クリープ変形で歪を与えた場合，定常クリープ初期に相当する1%の歪の試料で成長率最大の結晶粒成長がみられた。

第3図の曲線A, B, Dはいずれも結晶粒の成長開始までに数10時間の潜伏期があることを示している。再結晶の現象には潜伏期があることが特徴の一つであるが今回の実験では歪と潜伏時間の関係は明らかではない。




第4図　歪1%の試料にみられた再結晶の不均一成長，応力除去後の時間は，a：72時間，b：312時間，c：408時間

**c. 再結晶粒の主軸方位**

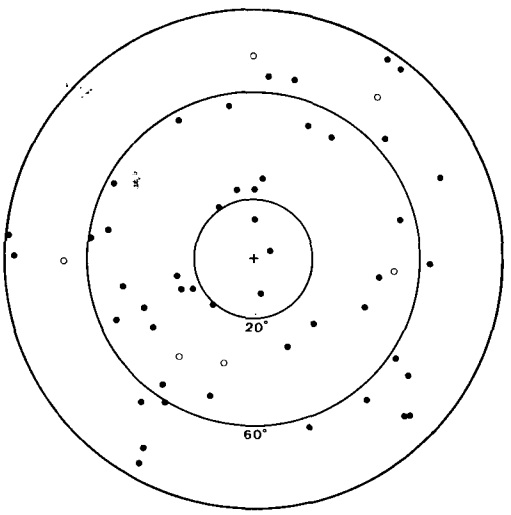
クリープ変形前の多結晶氷は粒径がほぼ均一(1 mm)で，気泡を含まず結晶粒の主軸方位分布は無定方位であった[5]。このような試料に所定の歪を与えたのち応力を除去すると，加速クリープ領域まで変形した試料を除きいずれも時間と共に結晶粒は増大し，応力を除去した直後の組織とはまったく異なった。組織変化をもたらせた結晶粒の成長は変形中に生じた新しい結晶核が成長した再結晶粒であるから変形前の母結晶とは主軸方位分布に於いても変形の効果が期待される。

第5図のシュミットネット上の黒丸は1%の歪を与えて応力を除去し，−10°Cの恒温箱で

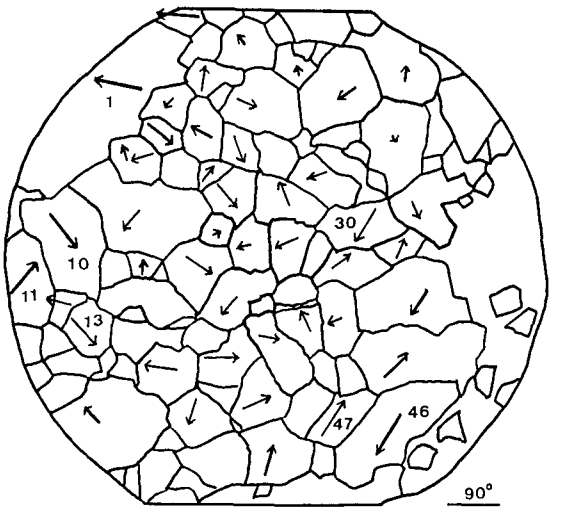
約400時間保存した試料の応力軸に垂直な面の薄片内で，特に成長の著しかった50個の結晶粒の主軸方位を示す。また白丸は同じ応力で0.7% の歪を与えた試料の50時間後の薄片内にみられた6個の異常成長した結晶粒の主軸を示す。

第6図には黒丸で主軸方位を記入した各結晶粒の粒形を薄片写真からトレースして示した。前節第3図の曲線Aのように初期歪1% を与えた試料の400時間後の平均の結晶粒断面積は初期値の約6.5倍であった。しかし，方位決定に選んだ成長の著しい50個の結晶粒の平均の結晶粒断面積は15.3 $mm^2$ で結晶の成長率は約14であった。従って第6図に示した主軸方位の測定数は50個の結晶粒についてのものであるが，再結晶の選択方位を代表しているということができる。また，白丸で示した6個の主軸方位は0.7% の歪を与えた試料内で成長した再結晶粒のものである。クリープ曲線の上では，この程度の歪はまだ安定した定常クリープ領域には入っていない。しかしこの歪でも既に再結晶核が生じそれらが応力緩和過程で急速に成長したことを示している。なお6個の結晶の主軸は圧縮軸に対して36°～70° の間にあった。

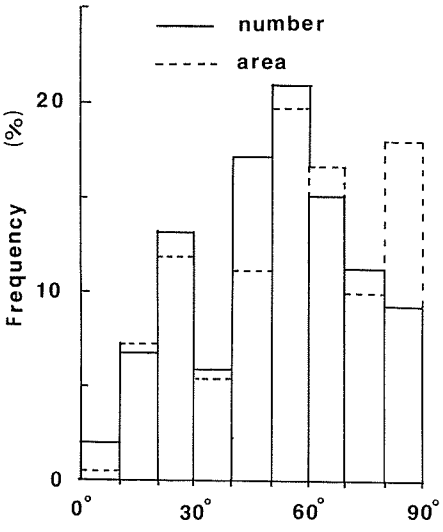
第7図は歪1% の試料の応力緩和400時間後の再結晶の主軸を応力軸に対して示したヒストグラムである。実線と点線はそれぞれ粒子数と断面積を示す。断面積のヒストグラムは全測定粒子の断面積の総和に対する各角度範囲に属する粒子の断面積の和の割合を示す。再結晶粒の粒径が均一であれば両ヒストグラムは一致するが主軸方位による粒径に分布がある場合にはその限りではない。例えば第6図の結晶粒界図に数字1, 10, 11, 13, 30, 46, 47を記入した結晶粒はいずれも主軸が圧縮軸に対して80°～90° の範囲にあり，これらの結晶断面積が大きいためにこの角度範囲では断面積ヒストグラムが粒子数ヒストグラムより大きくなった。これと逆の傾向は40°～49° の範囲の結晶粒にみられ，この角度範囲の結晶の粒径が平均的に小さいことを示している。



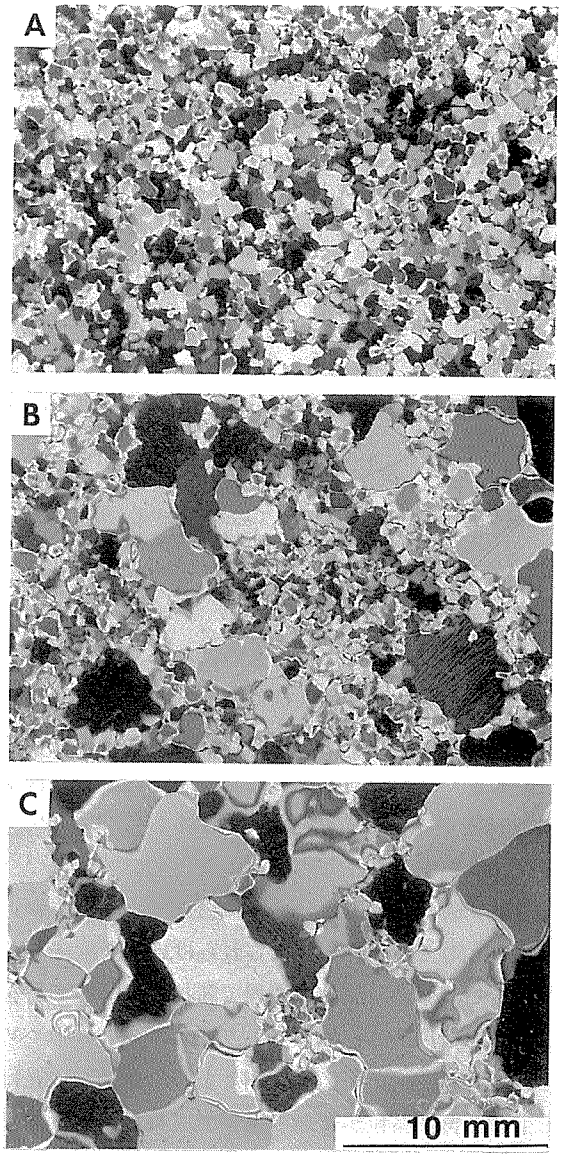

**第5図** 初期歪1% の試料の成長完了時の再結晶粒の主軸方位分布。中心は圧縮軸の方向を示す




**第6図** 第5図に主軸方位を示した個々の結晶粒の粒形を示す。矢印の向きは紙面に投影した主軸方向を，長さは応力軸と主軸のなす角度を表す。右下に示した基準線の長さは主軸と応力軸が90° の時を表す



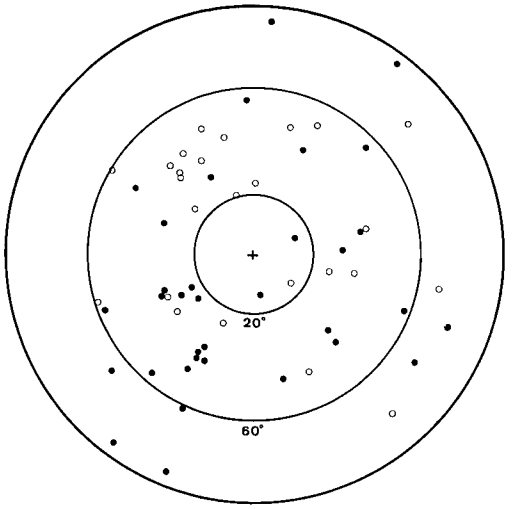

第7図　初期歪1%の試料に成長した再結晶粒の主軸方位の応力軸を基準にしたヒストグラム。実線は結晶粒数ヒストグラムを，点線はそれぞれの角度範囲に属する結晶粒の断面積ヒストグラムを示す



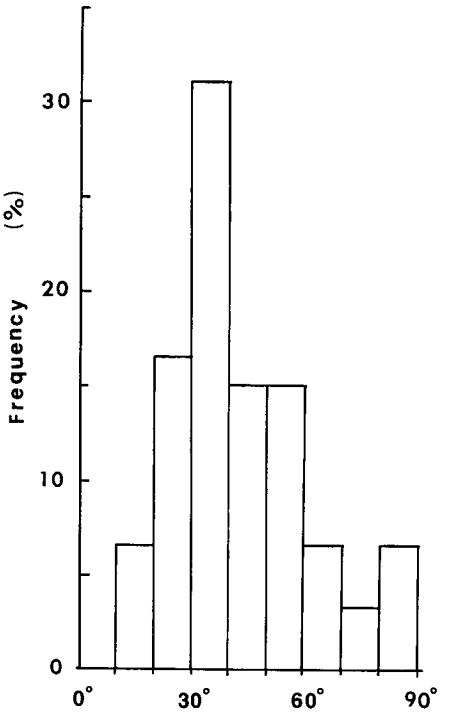

第8図　10.5%の減速クリープ初期の歪を与えた試料内の再結晶の成長

応力を除去してからの時間はA：30分，B：97時間，C：168時間

第8図は歪10.5%を与えた試料の応力除去後30分 (A)，97時間 (B) 168 (C) 時間の薄片写真である。この歪は減速クリープ領域の初期に相当するがAにみられるように結晶粒は応力負荷前より細分化されている。これは加速領域で急速に成長した結晶粒が歪を受けクリープ変形過程における第二段階の再結晶粒を生じたためである。97時間後の薄片写真Bは比較的早い時期に成長した再結晶粒を，Cは再結晶粒が成長しながら徐々に試料全体を侵食していく過程を示す。薄片B，Cの再結晶粒の主軸方位をシュミットネットにプロットしたのが第9図である。白丸が応力を除去してから97時間の間に優先的に成長した再結晶粒で，薄片写真Bにみられる結晶の主軸を，黒丸は薄片写真Cの再結晶粒の主軸方位を示す。中心は応力軸の方向である。第10図は第9図に示した全ての再結晶粒の主軸方位の応力軸に対する角度ヒストグラムである。応力除去後168時間後の再結晶粒の中には応力軸に対して90°近い主軸方位を持つものがあるが，応力除去後早い時期に成長を始め




**第9図** 10.5% の歪を与えて応力を除去し，97 時間と 168 時間経過した試料内で優先的に成長した再結晶粒の主軸方位分布。○：97 時間後，●：168 時間後




**第10図** 第9図の主軸方位分布図に示した全ての結晶粒について，応力軸と主軸方位のなす角度を示すヒストグラム

た再結晶粒にはそのようなものはない。この場合にも歪の小さい場合と同様に，応力軸に対して 80° 以上の角度を持つ少数の結晶粒は他のものより粒径が大きくなる傾向を示した。全再結晶粒の約 80% はその主軸方位が応力軸に対して 20°～60° の範囲に集中した。

第9図の主軸方位分布図に白丸で示した主軸方位は再結晶成長の初期に成長しはじめた結晶粒のものである。従ってこれらは応力を除去した後，多数の再結晶核の中から優先的に成長した結晶であり，成長の過程で隣接再結晶の影響を受けていない。これらの主軸方位分布には成長後期の再結晶粒に比べより顕著な 20°～50° への集中化がみられた。

歪 7.5% の試料では応力除去後の結晶粒成長はみられなかった。これは定常クリープ領域で生じた再結晶粒が変形の過程で成長を完了して歪エネルギーを解消したためと考えられる。加速クリープ領域で成長した再結晶の主軸方位については先に報告したが[5] 応力軸に対して 10°～50° の範囲に集中した。

## IV. 考　　察

破壊を起こさない程度の荷重でクリープ変形させて所定の歪を与えた多結晶氷内の歪エネルギーは必ずしも歪量には比例せず，試料内部でのエネルギー分布も一様ではない。これは大きな歪速度で変形する場合とは異なり，変形の過程で歪エネルギーの一部が再結晶の核の形成と成長のために解消されるからである。したがって，巨視的な歪が同じでも歪速度が異なれば結晶の組織が異なるために，再結晶核の数，その空間的分布，歪エネルギー分布なども異なる

ので応力を除去してからの再結晶の様子も違ったものになる。

一般に再結晶は歪エネルギーを駆動力とするために，その成長速度は歪に比例すると考えられている。Ohtomo[7] は単結晶の一部に切れ目をいれてから歪を与えることにより再結晶の核を発生させ，単結晶内に優先的に成長していく再結晶粒の成長速度が歪に比例することを示した。しかし，この場合の歪速度は大きく，再結晶核の発生は破壊変形によってもたらされたために，歪エネルギーの大部分が再結晶の成長に使われたと考えられる。これに対して我々の実験では前節 a, b で述べたように所定の歪を与える過程で，歪に相応して再結晶核の発生とその成長による組織の変化が起こるので，応力を除去してからの再結晶の成長速度と歪とは比例しない。

一連のクリープ変形により，およそ 15% の歪に到達する間に再結晶の核の発生は二つの歪領域で起こった。第一段階は歪が 1～2% の定常クリープ領域であり，第二段階は歪が 10% 前後から始まる減速クリープ領域である。この範囲の初期歪を与えた試料内では応力を除去した後に再結晶が成長した。しかし，7.5% の初期歪を与えた試料のように，加速クリープ領域の歪を与えた多結晶氷試料では応力を除去してからの再結晶の成長は起こらなかった。これは加速クリープ現象そのものが再結晶粒の成長という組織変化によってもたらされることを意味する。

再結晶の成長の様子を簡単のために均一成長と不均一成長に分けた。不均一成長は，先に述べた核形成の二つの歪領域においては，より小さい歪を与えた試料内にみられた。また，成長完了時の再結晶の平均結晶断面積も不均一成長の場合の方が大きかった。これは核形成が可能な歪領域内で歪が小さければ，発生する再結晶核の数が少ないために再結晶同士が互いに干渉し合うことが少ないためと考えられる。

再結晶粒の主軸方位分布は，歪を与える前の無定方位分布から応力軸を中心とするガードル型の選択方位分布へと変化した。この傾向は加速クリープ中に成長した再結晶粒についても[5]，また今回の実験でみてきたように応力除去後に成長した再結晶粒についても同様である。結晶粒界に発生した核の中で優先的に成長することのできるものは試料内の歪エネルギーを速やかに低下させるのに都合のよい方位をもった結晶であろう。この条件を満たす結晶は，変形過程にあっては応力に対してせん断成分を持つ方位の結晶粒であり，応力除去後には，より大きな歪エネルギーを蓄えた結晶粒と同じ方位を持つ結晶粒であると考えることができる。その結果，両方の再結晶粒の主軸方位は応力軸に対して同様の傾向を示すことになる。

応力軸に対して大きな角度を持つ少数個の再結晶粒の平均粒径が他のものよりも大きいことの原因はあきらかではない。一つの可能性としてあらかじめこのような方位にある結晶粒は変形しにくいため，内部応力は保持される。このような結晶粒をとりまく粒界に生じた再結晶核のなかで同じ結晶方位をもったものは母結晶の弾性歪エネルギーを駆動力として成長することができる。

## V. ま と め

クリープによって人工多結晶氷に歪を与えた後応力を除去し，試料内の再結晶によって起

こる組織変化と与えた歪との関係について調べた。その結果，再結晶粒の生長速度や最終的な結晶粒径は与えた歪の絶対値よりも歪に対応した特有の組織に支配されていることがわかった。

1～2% の定常クリープ領域に相当する歪を与えた試料と，10% 以上の減速クリープ領域の歪を与えた試料では応力を除去した後で再結晶が成長した。しかし，変形の加速度が最大になる 7～8% の加速クリープ領域の歪を与えた試料内では応力を除去した後の再結晶は起こらなかった。

それぞれの再結晶核を発生させる歪領域においては，より小さい歪を与えた試料では特定の再結晶の急速成長による不均一な成長が起こり，再結晶の最終的な平均断面積は，各結晶粒が平均して成長する均一成長の場合よりも大きくなった。

再結晶粒の主軸方位分布は応力軸を中心とするガードル型の分布になった。このような主軸方位分布はクリープ変形中に再結晶の成長が完了した歪 7.5% の試料でも，また応力を除去した後で成長を開始した再結晶粒についても同様であった。

不均一成長の場合，応力を除去したあと早い時期に優先的に成長し始める再結晶粒の主軸方位分布は成長完了時の分布に比べより顕著な 20°～50° への集中化がみられた。

従来の再結晶に関する研究は融点にきわめて近い 0°～－3°C の温度で行われたものが多かった。我々の実験は多結晶氷の力学的性質において再結晶の効果が現れ始める －10°C で行った。これは自然界では流動と再結晶という一連の過程がほぼ同じ温度環境のもとで起こる場合が多いこと，さらに再結晶を核形成と成長の過程に分けて観察するためには，変化の遅い低温度での実験の方が好都合であるためである。

おわりに，本論文を書くにあたり有益な助言と論文の校閲をしてくださった応用物理学部門藤野和夫教授に感謝します。実験に使用した高圧容器は鈴木義男北大名誉教授の設計によるものである。あわせて感謝の意を表します。実験には工作部ならびに機関室の方々のご協力を得た。ここに感謝の意を表します。

## 文　献

1) Kamb, B. 1972 Experimental recrystallization of ice under stress. *In* Flow and Fracture of Rocks, ed. H. C. Heard, I. Y. Borg, N. L. Carter, C. B. Raleigh Geophysical Monograph No. 16, 211-241.
2) Tanaka, H. 1972 On preferred orientation of glacier and experimentally deformed ice. *J. Geol. Soc. Japan*, **78**, No. 12, 659-675.
3) 黄　茂桓，大伴武都美，若浜五郎 1982 多結晶氷のくり返し再結晶実験．低温科学，物理篇，**41**，13-23.
4) Wilson, C. J. L. and Russell-Head, D. S. 1982 Steady-state preferred orientation of ice deformed in plane strain at －1°C. *J. Glaciol.*, **28**, No. 98, 145-160.
5) 水野悠紀子，鈴木義男 1988 静水圧の下での多結晶氷のクリープ実験．低温科学，物理篇，**47**，1-13.
6) 東　晃，福田明治，庄子　仁，木曾直吉 1973 氷多結晶の歪焼鈍による結晶成長．雪氷，**35**，3号，1-12.
7) Ohtomo, M. 1984 Crystallographic orientation of recrystallized grain grown in the deformed single crystal of ice. Contr. Inst. Low Temp. Sci., Ser. A. **34**, 1-21.

**Summary**

Recrystallization occurring in a process of stress relaxation has been studied at −10°C, using a polycrystalline ice previously deformed to various values of creep strain. It was found that growth features of a recrystallized grain were strongly influenced by the initial strain. As has been shown in the previous paper[5], the texture of a polycrystalline ice changes correlatively with each stage of creep strain.

Under a hydrostatic pressure of several 10 MPa and a moderate compressive stress (1～3 MPa), a creep curve up to the strain of 15% is schematically shown as in Fig. 1. We prepared samples with four different initial strains denoted a, b, c and d on the creep curve. Figure 2 shows the thin sections of the samples whose strains are 1% (A), 1.9% (B), 7.5% (C) and 14.5% (D). Thin sections A and B correspond respectively to the initial and the final stage of steady state creep, and sections C and D correspond respectively to the accelerative and the decelerative creep.

Mean cross section of recrystallized grains, which was obtained from a section photograph, plotted against annealing time for the four samples is shown in Fig. 3. In this figure, each curve A, B, C and D shows the growing manner of recrystallized grains in the sample whose thin section of the initial stage appears in Fig. 2 indicated by the same latter. Except for curve C, the curves increase with annealing time after an incubation period of several 10 hours. The fact that curve C does not increase with time indicates that in the sample, previously deformed to a level of strain corresponding to the accelerative creep, most strain energy has been spent for grain growth during deformation. For convenience, increasing manners of curves A and B, D are divided into inhomogeneous and homogeneous growth respectively.

During a compressive creep deformation up to a strain of 15%, recrystallization nuclei appeared within both the steady state ($e=1\sim2\%$) and the decelerative creep ($e\geq10\%$). The two types of growing manner are due to the differences in number and in distribution of nuclei at grain boundaries. Inhomogeneous growth took place in the samples whose initial strain ranged within the starting region of both steady state and decelerative creep. Figure 4 shows an example of inhomogeneous growth occurring in the sample whose initial strain was 1% and the pictures a, b and c are the thin sections made respectively 72 hours, 312 hours and 408 hours after stress relaxation. As is shown in the figure, several grains grew preferentially faster than others (a and b), and after that other crystals grew depending on the local strain energy. On the other hand, in the sample which was strained to 1.9%, recrystallization started at every grain boundary and grains grew homogeneously. Similar homogeneous growth was observed in the sample whose initial strain was 14.5%. However, the grain size in this highly deformed sample had been reduced to less than half of an original one and the final grain size was also smaller than that in the sample started from the strain of 1.9%.

Defining a growth factor, $G$, as a ratio of the final mean cross section to the initial one, the following growth factors were obtained: $G(\mathrm{A})=6.4$, $G(\mathrm{B})=4.8$, $G(\mathrm{C})=1$, $G(\mathrm{D})=2.3$.

C-axes of about 50 grains which were preferentially grown in the sample of 1% strain during 400 hours annealing time, were determined by X-ray Laue method. They are plotted on the Shmidt net with closed circles, where the center is the stress direction (Fig. 5). The

six open circles in the figure are c-axes of grains recrystallized in the sample subjected to a strain of only 0.7%.

Figure 8 shows another inhomogeneous growth occurring in the sample deformed to a strain of 10.5%, which corresponds to the initial stage of the decelerative creep. Each thin section was sequentially made at an annealing time of 30 minutes (A), 97 hours (B) and of 168 hours (C). C-axes of several tens of grains preferentially grown within 97 hours and 168 hours are plotted on the Schmidt net shown in Fig. 9, where the open circles represent c-axes of the 97 hours grains and the closed ones are those of the 168 hours grains. C-axes of about 80 percent of recrystallized grains were concentrated within the angle between 20° to 60° respective to the stress axis. The similar c-axis preferred orientation was observed in every recrystallized grain grown homogeneously in a process of strain annealing, and in those grown dynamically during an accelerative creep.