



Title	静水圧の下での多結晶氷のクリープ実験
Author(s)	水野, 悠紀子; MIZUNO, Yukiko; 鈴木, 義男 他
Citation	低温科学. 物理篇, 47, 1-13
Issue Date	1989-03-10
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18560">https://hdl.handle.net/2115/18560</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	47_p1-13.pdf



## 静水圧の下での多結晶氷のクリープ実験\*

水野悠紀子・鈴木義男

(低温科学研究所)

(昭和63年10月受理)

### I. 緒 言

静水圧下で氷の力学的性質を調べることは氷河や氷床の深部での氷の挙動を知る上で重要である。地球上の氷の多くが他の物質に比べて融点に近い温度条件下にあることを考えると、静水圧下で氷の力学実験をすることは地球内部の岩石力学など、高温、高圧下での物質の力学的性質への適用という観点からも意味がある。

Rigsby<sup>1)</sup>は35 MPaまでの静水圧下で単結晶氷の剪断実験をおこない、その塑性変形には静水圧の効果はないと結論した。その後、人工多結晶氷<sup>2-5)</sup>や、氷河、氷床深部氷<sup>5,6)</sup>を使った静水圧下でおこなわれた実験では、静水圧が力学的性質や結晶成長<sup>7)</sup>に与える影響について研究されてきたが、力学的性質に対する静水圧の効果についての解釈はかならずしも一致していない。これは変形速度や温度、試料の初期条件などが実験結果に複雑に関連するためと考えられる。

著者らは小型で操作性が良く、短時間で最大50 MPaまでの安定した静水圧が得られる高圧容器内で人工多結晶氷の一軸圧縮クリープ実験をおこなった。大気圧下では $10^{-6}$ /s以上の歪速度では氷の内部にクラックを生じるが、10 MPa以上の静水圧を与えると、試料氷にクラックを生じることなく20%以上の大きな歪を得ることが出来る。

このことを利用して、人工多結晶氷に定常クリープ速度が $10^{-7}$ /s~ $10^{-6}$ /sになるように一軸圧縮応力を与え、クリープ歪が20%までの広範囲の歪の各段階における氷試料の微視的変化過程を観察し、遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープ、および減速クリープが、それぞれ結晶組織や主軸方位分布のいかなる変化に対応しているかを明らかにした。

### II. 実 験

#### 1. 高 圧 容 器

高圧下での力学実験は装置が大がかりになり、それに伴う操作の煩雑さ等のために、さまざまな困難がある。著者の一人鈴木は小型で且つ容易に50 MPaまでの安定した静水圧が得られる装置を開発した。この装置により、現在のところ圧縮クリープ実験に限られてはいるが、高圧下での力学実験が比較的容易におこなえるようになった。第1図に高圧容器を含む一

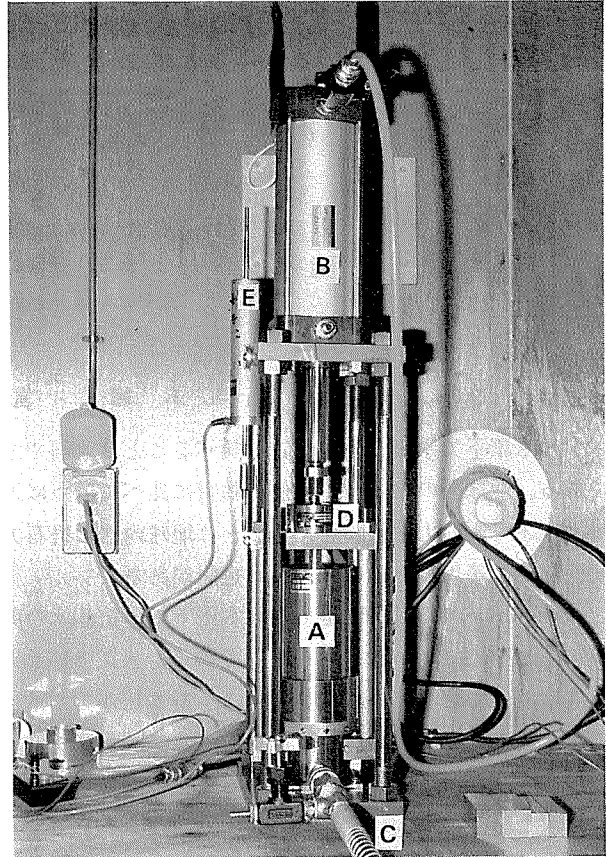
\* 北海道大学低温科学研究所業績 第3179号

軸圧縮クリープ実験装置を示した。Aは高圧容器でCに連結した手動の油圧ポンプにより50 MPaまで加圧することができる。一軸圧縮応力はエアシリンダーBにより負荷される。エアシリンダーは圧縮窒素ガスにより作動する。ガス圧を調節することにより、任意の一定応力を負荷できる。実験中の圧縮応力はエアシリンダーのピストンと氷の変形にともなって高圧容器内を貫入していくピストンとの間に取り付けられた圧力変換器Dにより測定した。また氷の変形量は容器内に貫入するピストンの変位を変位形Eで測定した。

第2図は第1図の高圧容器Aの部分の模式図である。容器内には氷を溶かさず $-30^{\circ}\text{C}$ の低温度でも粘性の低い特殊な油を満してあり、それを圧力媒体とし手動ポンプで最大50 MPaまで加圧することができる。一軸圧縮応力はエアシリンダーにより、圧力変換器、フレーム、ピ

ストン $P_1$ を介して氷に作用する。上部ピストン $P_1$ は容器内に貫入しながら氷試料を変形させる。 $P_1$ が貫入するにつれて容器内の体積が変化し、静水圧が増加するのを防ぐために下部にとり付けてある $P_1$ と直径の等しいピストン $P_2$ が移動し、容器内の体積を補正し一定に保つようにしてある。すなわち、 $P_1$ 、 $P_2$ 、フレームが一体となって上下動するため、 $P_1$ の貫入分だけ $P_2$ は容器の外に引き出され、それによって容器内の空間体積の変化は相殺されて静水圧は一定に保たれる。この方法は東ら<sup>6)</sup>の作製した加圧タンクの機構を参考にした。

ピストン $P_1$ 、 $P_2$ の貫入口にはバックアップリングが取り付けられているため、この部分からの油漏れはない。圧力容器は $C_1$ 、 $C_2$ の2つの部分に分かれ、試料をセットする時には専用治具を取りつけエアシリンダーにより $C_1$ 部分を引き上げる。エアシリンダーは上下の空気注入口を使いわけること、圧縮応力の負荷と、重い容器の吊り上げの二つの目的に使用された。試料をセットした後 $C_1$ 、 $C_2$ 部分を結合し、容器下部の注入口から油を入れる。油を注入している間ピストン $P_1$ をとりのぞいてあるので油中の空気は自然に容器外に排出される。静水圧は容器下部に取りつけられた圧力変換器で測定され、一軸圧縮応力、変位量とともに記録された。



第1図 50 MPaまで加圧できる圧力容器と一軸圧縮実験系。A：圧力容器，B：エアシリンダー，D：ロードセル，E：変位計

加圧開始から所定の静水圧に達するまでの所用時間はおもに試料の空隙率に依存する。空隙率が3%以下の多結晶氷を試料としたばあい、容器内は約30分間で所定の圧力に達し、数カ月間は一定圧力を保持した。

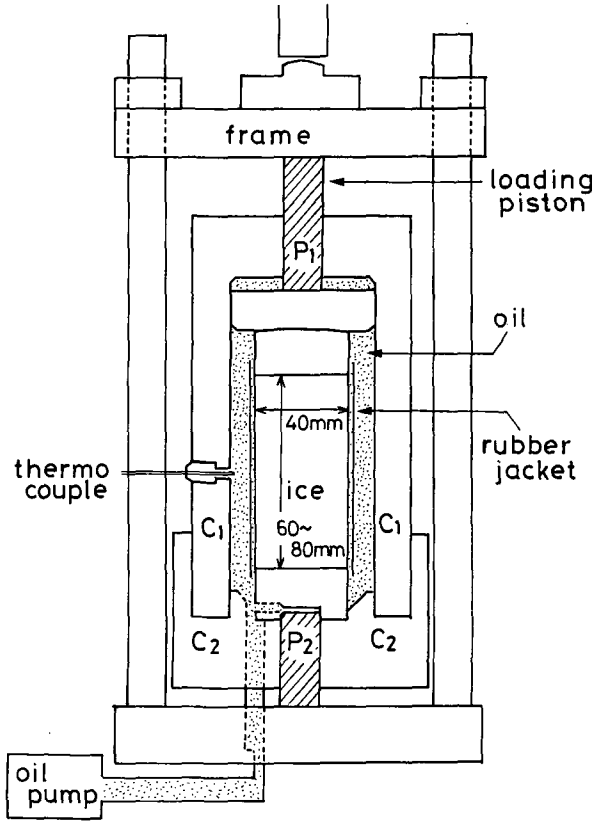
試料の温度は圧力容器の壁面にさし込まれた熱電対により測定した。また使用した油は水を溶かさなないが、圧力によって結晶粒界など試料内部への浸入をさけるために試料をゴムジャケットで被覆した。

2. 試料, 実験条件

人工多結晶氷は低温室に保存していたしまり雪をほぐしてふるい分けし、粒径が0.5~1mmの間に入る雪粒を用いて作製した。直径40mm, 長さ120mmの円筒容器に雪粒を入れ、密度がおよそ550 kg/m<sup>3</sup>になるまでタッピングで圧縮したのち、0°Cの蒸留水を浸み込ませて凍結させた。このようにして作ったゆきごおりの密度は890~900 kg/m<sup>3</sup>

であった。したがって氷には空隙率にして2~3%に相当する気泡を含んでいる。これらの気泡の大きさは最大でも200 μmで主に結晶粒界に存在した。凍結は多くのばあい円柱の周囲から中心に向かって進行したため、得られた多結晶氷の粒径は周辺部が大きく中心部ほど小さかった。このように気泡を含み且つ結晶粒径も不均一な氷にある期間静水圧を加圧しておく、気泡は消失し粒径もほぼ均一化された。力学試験には、ゆきごおりにあらかじめ30 MPaの静水圧を-10°Cで2~3日間加圧して粒径がほぼ均一で気泡のない多結晶氷を用いた。

クリープ実験の多くは-10°C±0.5°Cの温度でおこなわれたが、圧力による融点降下を考慮した実験では圧力に対する平衡融点からの差が等しくなる温度でおこなった。試料の形状と大きさは直径40mm, 長さ60~80mmの円柱である。負荷した一軸圧縮応力は1~3 MPaでこの応力による定常クリープ速度は10<sup>-7</sup>/s~10<sup>-6</sup>/sであった。



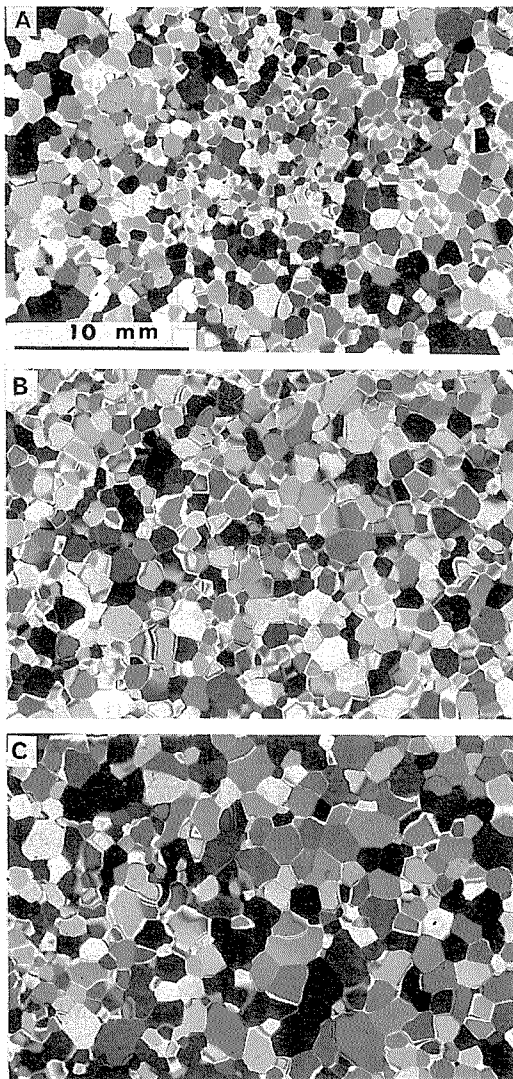
第2図 高圧容器の模式図

圧縮応力が加わるとフレーム、ピストン P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> が一体となって下降し氷を圧縮する。試料はゴムジャケットで油と隔離されている。容器は C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> に分割され、試料セット時 C<sub>1</sub> はエアシリンダーで吊り上げられる。

### III. 結果と考察

#### 1. 静水圧による組織変化と主軸方位分布

第3図は  $-10^{\circ}\text{C}$  で静水圧を 30 MPa かけたときの加圧時間による粒径の変化を示す薄片写真である。A, B, C はそれぞれ静水圧加圧前の初期試料, 72 時間後, 116 時間後の薄片写真である。第4図 A, B, C はそれぞれ第3図の A, B, C に対応している。第4図の結晶粒径は特定の方向の最長径 (フェレ径,  $X$ ) を示している。また測定粒子数は, 一定面積内の粒子数をとったために, A, B, C の測定粒子数はそれぞれ 588 個, 450 個, 323 個である。第4図の粒径区分は 1 mm を 4 分割しその範囲を中点で示した。例えば 0.5~0.75 mm の範囲の粒径は 0.63 の点で代表した。

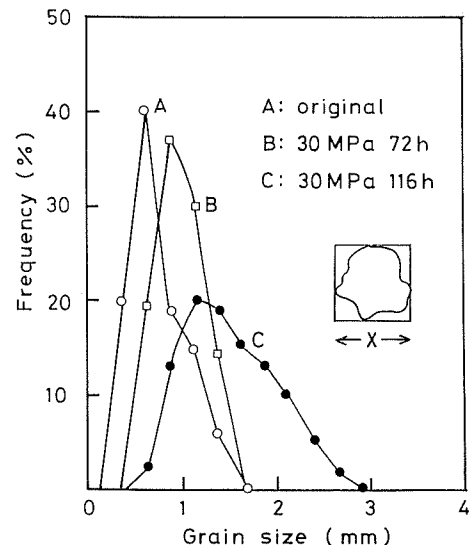


第3図 静水圧加圧時間による組織変化

A: 初期試料, B: 30 MPa, 77 時間,  
C: 30 MPa, 116 時間

第3, 4図から明らかなように, 一定の静水圧の下では加圧時間とともに粒径は増大する。Azuma と Higashi<sup>7)</sup> は南極氷床氷と人工多結晶氷について結晶粒の粗大化に対する静水圧の効果について調べ, 静水圧が大きいほど, 結晶粒の平均的な粒大化速度が大きくなることを示した。また南極氷床氷の結晶粒の粗大化速度は, 残留応力のために人工多結晶氷のそれより1オーダー大きいことを示した。

第3, 4図から明らかなように, 一定の静水圧の下では加圧時間とともに粒径は増大する。Azuma と Higashi<sup>7)</sup> は南極氷床氷と人工多結晶氷について結晶粒の粗大化に対する静水圧の効果について調べ, 静水圧が大きいほど, 結晶粒の平均的な粒大化速度が大きくなることを示した。また南極氷床氷の結晶粒の粗大化速度は, 残留応力のために人工多結晶氷のそれより1オーダー大きいことを示した。

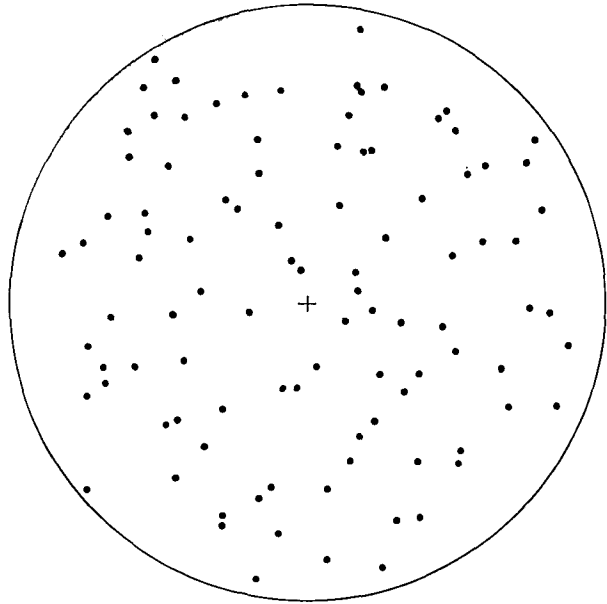


第4図 静水圧加圧時間と粒径分布変化。

測定粒子数 A = 588, B = 450, C = 323

先に述べたように、ゆきごおりの粒径分布は試料の場所により異なる。これは凍結がおもに周囲から中心部に向かって進むために生じるもので、中心部ほど粒径は小さく凍結による応力集中も大きい。このような試料に静水圧をかけるとまず最初に粒径の均一化が起こる。これは中心部の粒径の小さいものほど、結晶粒への応力集中が大きく、また粒界エネルギーの効果が大きいために粗大化速度が大きいと考えられる。 $-10^{\circ}\text{C}$  で静水圧 30 MPa を 40 時間以上かけると初期試料にみられる粒径の不均一は除去され、気泡も消失した。

静水圧が粒径分布など、結晶組織をかえることは実験結果より明らかであるが、それにとまって結晶粒の主軸方位分布がどのように変化するかを調べた。初期試料はしまり雪をほぐし、鋳型に入れて水を浸み込ませたものであるから、個々の結晶粒の主軸方位は完全に無秩序な方向を向いていると考えてさしつかえない。この試料に  $-10^{\circ}\text{C}$  で静水圧 35 MPa を 376 時間加圧したのち薄片を作り、個々の粒子の方位を X 線ラウエ法で決めた。第 5 図は主軸方位を Schmidt ネット上にプロットしたものである。中心は円柱試料の軸方位である。図から明らかなように、主軸方位分布に特定の選択方位性は認められない。このことから静水圧は多結晶氷の組織に変化を与えるが、主軸方位分布には影響を与えないことが確かめられた。



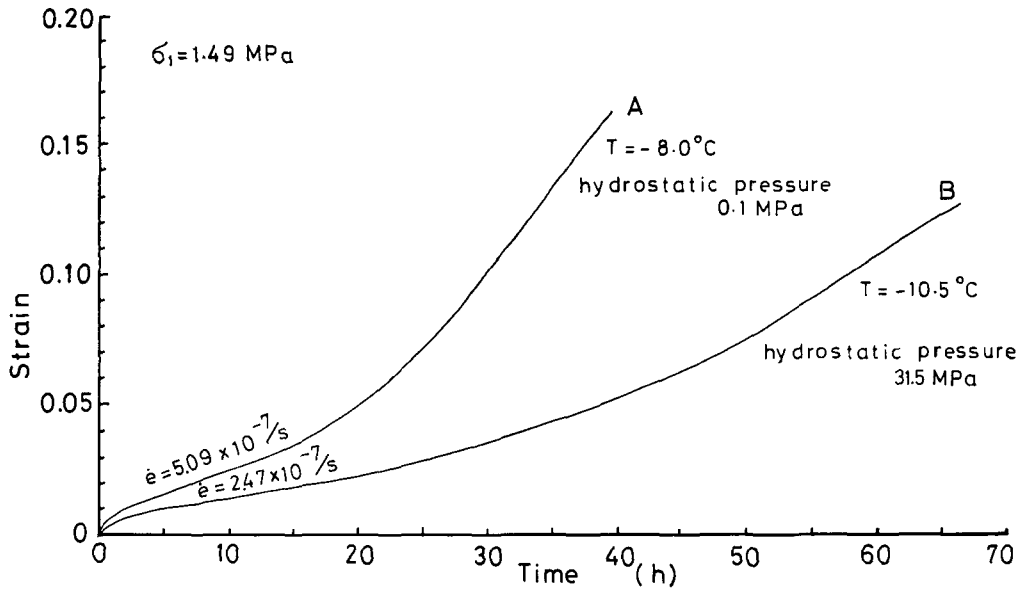
第 5 図 静水圧 35 MPa を 376 時間加圧した後の主軸方位分布図。優先方位分布はみられない

多結晶氷に静水圧をかけると気泡のまわりの応力集中や結晶粒界の影響のために内部組織に変化を生じる。静水圧加圧による顕著な変化は数 10 MPa の静水圧を 40~50 時間与えると気泡は縮小、消失して光学的に透明な氷になることである。もう一つは静水圧による粒径の均一化と粗大化である。

## 2. クリープ歪に対する静水圧の効果

静水圧 0.1 MPa~45 MPa、一軸圧縮応力 1 MPa~3 MPa の種々の条件で約 40 の試料についてクリープ (歪-時間) 曲線を得た。第 6 図には典型的なクリープ曲線の例を示した。試料はいずれも前節で述べた方法で作製した結晶学的に等方で気泡を含まない多結晶氷である。曲線 A, B とも圧縮応力  $\sigma_1$  は 1.49 MPa である。ここで  $\sigma_1$  は偏差応力である。A は静水圧をかけていない状態でのクリープ曲線で、B は静水圧 31.5 MPa でのクリープ曲線である。

氷の力学的性質に対する静水圧の効果を知るためには温度や試料の初期条件を一定にする



第6図 クリープ曲線の例。Aは大気圧下、Bは31.5 MPaの静水圧下でのクリープ曲線。偏差応力はA、Bとも1.15 MPa、温度は平衡融点からの差がほぼ8°Cである

必要がある。A、Bの曲線は圧力による融点降下を考慮してそれぞれの圧力に対する平衡融点からの差が等しくなる温度でおこなったものである。31.5 MPaの圧力に対する融点降下は2.36°Cであるから、曲線A、Bはいずれも平衡融点からの差がほぼ8°Cになる温度でのクリープ曲線である。

図から明らかなように、31.5 MPaの静水圧が加われば、1.49 MPaの応力のばあい、定常クリープ速度は約半分に低下する。また加速クリープ領域でも静水圧の効果は持続される。クリープ歪が10%に達するまでに大気圧下では約30時間であったが、31.5 MPaの静水圧下では約60時間を要した。

一軸圧縮応力1~3 MPaに対する定常クリープ速度は $10^{-7}/s$ から $10^{-6}/s$ の領域である。この歪速度は転位クリープ領域であるとともに、 $-10^{\circ}C$ 前後という温度を考えると、再結晶の寄与が大きいことが予測される。我々の実験の結果は、定常クリープ領域のみならず加速領域においても静水圧が氷の変形を妨げる作用を示している。

JonesとChew<sup>3)</sup>は0.1~60 MPaの静水圧の下で $10^{-9}/s$ の歪速度領域のクリープ実験をおこなった。それによると、静水圧が0~15 MPaの間では静水圧の増加に伴って定常クリープ速度は減少するが30~60 MPaの領域では逆に静水圧の増加と共に定常クリープ速度は増加した。彼等の実験は $-9.6^{\circ}C$ の一定温度でおこなわれた。このため30 MPa以上の静水圧下でクリープ速度が増すのは、静水圧が変形を促すのではなく、むしろ静水圧による融点降下の影響のためと考えられる。

一般にクリープ曲線は遷移クリープ、定常クリープ、加速クリープと推移する。Duval他<sup>8)</sup>は大気圧下で多結晶氷のクリープ実験をおこない、加速クリープの原因が多くのばあい内部ク

ラックの発生によるとしている。我々の実験では数 MPa 以上の静水圧をかけると、加速領域でもクラックはまったくみられなかった。

静水圧下ではクラックを発生せずに 20% 以上の歪を得ることができる。歪がほぼ 10% になると、それより大きな歪領域では加速領域とは逆に歪の増大にともない歪速度が減少する第 4 のクリープ段階としての減速クリープが観察された。

3. 歪速度と歪の関係

第 7 図にクリープ曲線から求めた歪速度と歪の関係をプロットした。曲線 A, B は第 6 図のそれに対応し、さらに偏差応力が 1.15 MPa (E) と 2.97 MPa (C, D) の実験結果も示した。曲線 D, B, E は温度  $-10.5^{\circ}\text{C}$ 、

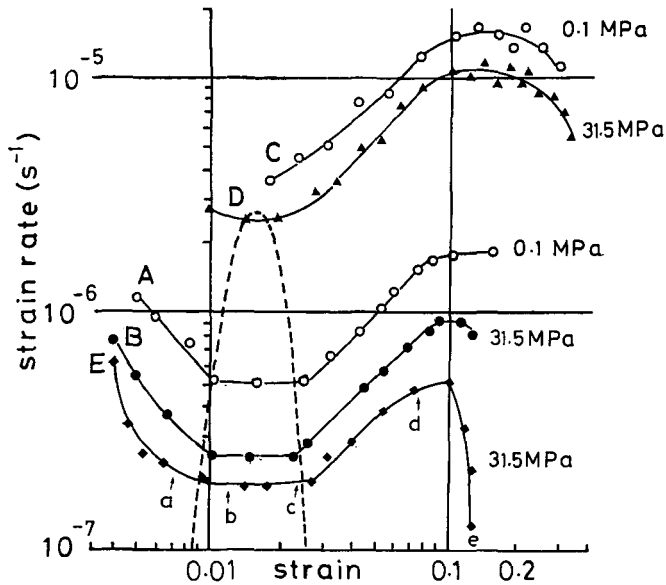
静水圧 31.5 MPa で偏差応力はそれぞれ 2.97 MPa, 1.49 MPa, 1.15 MPa である。いずれの場合にも定常クリープ領域は歪がほぼ 1% から 2% の間にあるが、応力が大きくなる程定常クリープ状態を示す歪領域は点線で示したように狭まっている。また偏差応力が 2.97 MPa のばあい、大気圧中での曲線 C では定常クリープ状態は認められなかった。

図から明らかなように遷移クリープは歪がほぼ 1% 以内の現象であり、定常クリープはおよそ 1% から 2% の歪領域に限られる。歪が 2.5% 以上 10% までは歪速度は歪とともに増大し、最大歪速度は 10~15% の歪で表われる。それより大きな歪に対して歪速度は急速に減少する。歪速度と歪の関係を調べることによって一連のクリープ変形における 4 段階の変化過程をより明確に示すことができる。

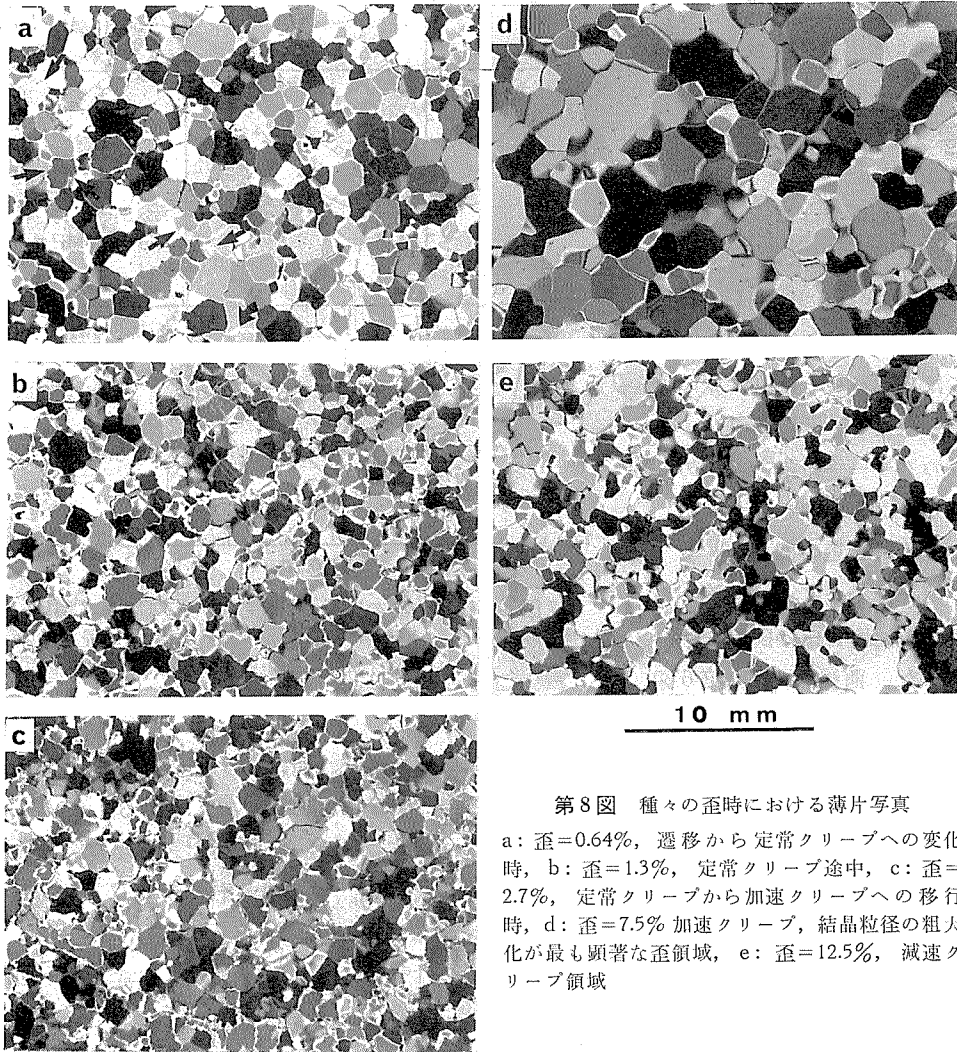
静水圧下での氷の変化は形状的にも大気圧のもとでの変形とは異なる。松田と木崎<sup>9)</sup>の多結晶氷の定歪速度実験では歪が 3% を越すと試料の中央部が肥大して円柱がビヤ樽型になった。しかし静水圧下では歪が 20% に達しても試料の中央部で歪量が増大することはなかった。

4. 歪と結晶組織

多結晶氷を静水圧下で一軸圧縮すると 20% 以上の大きな歪まで破壊せずに変形する。その間 4 段階のクリープ過程があること、また各クリープ状態はほぼ一定の歪領域に対応していることを示した。そこで各々の歪領域で内部組織にどのような変化が生じているかを圧縮軸に垂直な面の薄片を作り観察した。第 8 図の a~e の薄片写真はそれぞれ第 7 図の曲線 E に記さ



第 7 図 歪速度と歪の関係。偏差応力: C, D=2.97 MPa, A, B=1.45 MPa, E=1.15 MPa。数字は静水圧を示す。定常クリープの歪領域は応力により点線で示したように変わる



第8図 種々の歪における薄片写真

a: 歪=0.64%, 遷移から定常クリープへの変化時, b: 歪=1.3%, 定常クリープ途中, c: 歪=2.7%, 定常クリープから加速クリープへの移行時, d: 歪=7.5% 加速クリープ, 結晶粒径の粗大化が最も顕著な歪領域, e: 歪=12.5%, 減速クリープ領域

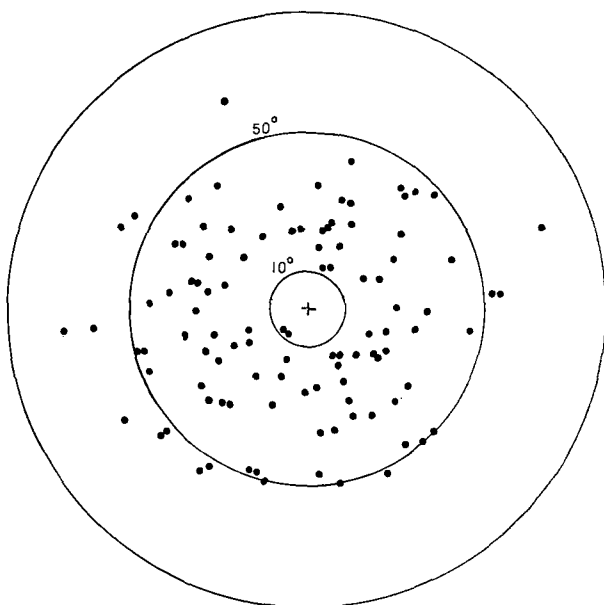
れたa~e点の歪に対応している。すなわち、静水圧 31.5 MPa、偏差応力 1.15 MPa のクリープ実験における特徴的な歪に対応する内部組織を示している。第8図 a の薄片は歪が 0.64% で、遷移クリープから定常クリープへの移行過程のものである。b は歪が 1.3% でまさに定常クリープが持続している領域の薄片である。c は歪が 2.7% で、ちょうど定常クリープから加速クリープへと移行する時点のものである。d, e はそれぞれ歪が 7.5% と、12.5% の薄片写真で、それぞれ加速クリープと減速クリープ領域の結晶組織である。

第8図 a をみると、歪はわずか 0.64% であるが結晶粒界のいくつかに屈曲したり、境界の不明瞭な部分が認められる（例えば矢印の部分）。遷移クリープは歪にしてわずか 1% 以内の現象であり、応力の負荷と同時に最も容易な変形機構に支配されている。すなわち容易すべりの可能な応力状態にある結晶粒でのみ底面滑りを起こすと考えられる。いくつかの屈曲した結晶粒界は容易すべりを起こした結晶によってもたらされたものと思われる。

第8図bは定常クリープ領域のほぼ中間域の結晶組織である。結晶粒界の大部分が屈曲し結晶粒が大きな歪状態にあることを示している。またいくつかの結晶粒界には既に再結晶粒が発生しはじめている。

cは定常クリープから加速クリープへの移行段階の内部組織であるが、結晶粒界のいたるところで再結晶が発生している。

dは加速クリープ最中の結晶組織で、この段階で結晶粒が急速に成長していることがわかる。個々の結晶粒の面積は、定常クリープ状態の結晶粒に比べ平均して4.5倍になった。この状態の結晶粒の主軸方位分布を第9図に示した。中心は圧縮方向で測定粒子は105個である。図から明らかなように主軸方向は圧縮



第9図 静水圧 31.5 MPa, 応縮応力 1.15 MPa で 7.5% の歪を与えられた試料の主軸方位分布。中心は圧縮軸, 主軸分布は圧縮軸に対して 10° から 50° の間に集中した

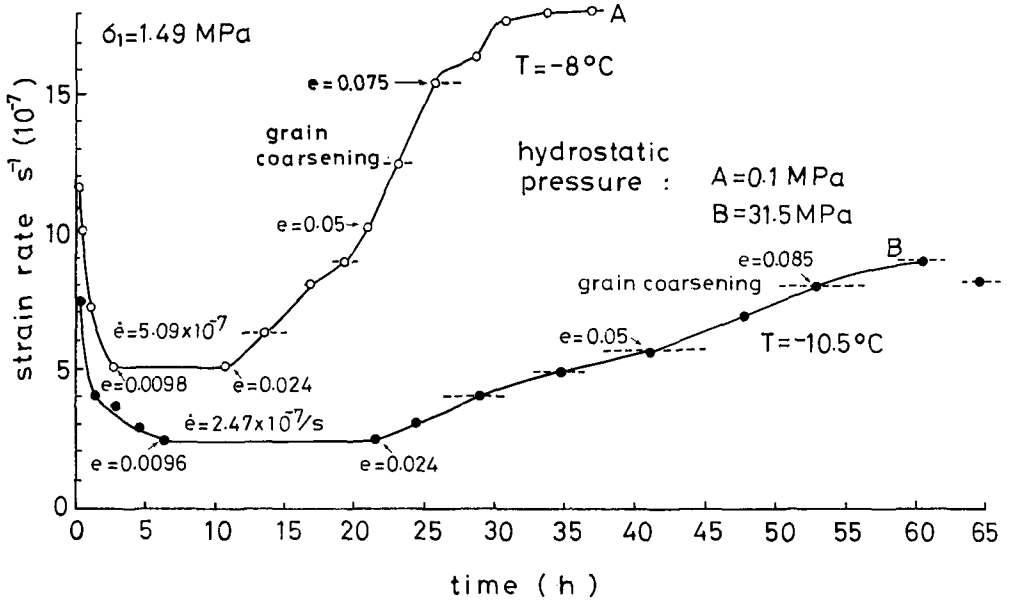
方向に対して 10°~50° の範囲内に存在した。すなわち、加速クリープ領域では結晶の主軸方位のほとんどは圧縮方向に対して 10° から 50° の間に集中し、それ以外の結晶粒は再結晶により消滅したことを示している。加速クリープ領域で現われる粗大化した結晶粒は定常クリープの段階で、結晶粒界に成長し始めた再結晶粒のうち、圧縮応力による歪を解放できる方位にあったものが他の結晶粒を浸食して成長した結果である。これは歪が 5% から 8% 位までの歪加速度が最大になる領域に対応する。第9図に示したように、歪が 7.5% の状態で主軸方位が圧縮軸に対して 10°~50° の間に集中している事実は、圧縮応力の剪断成分が結晶底面内にあるような再結晶粒が急速に成長し、歪エネルギーを解放しているということができる。

歪速度の最大値は 10% 前後の歪で表われるが、それより大きな歪領域で歪速度は急速に減少する。第8図eは 12.5% の歪を与えた試料の結晶組織である。dにみられた加速クリープ時の粗大化した結晶粒が再び細粒化され、結晶粒界も屈曲して大きな歪状態にあることがわかる。細粒化された結晶は新たに結晶粒内や粒界に成長した再結晶である。

#### 4. 歪速度と時間

前節で遷移、定常、加速、減速の各クリープ状態に対応する組織や主軸方位分布について述べ、歪速度は歪による組織や結晶主軸方位分布の変化を反映していることを明らかにした。

第10図は第6図に示したA, Bのクリープ曲線を歪速度と時間の関係で表わしたものである。実験温度はAが -8°C, Bが -10.5°C であるが、圧力による融点降下を考慮すると、平衡融点からの温度差は等しい。図から明らかなように、同一応力に対して1気圧下ではおよそ



第10図 通常のクリープ曲線を歪速度と時間の関係で示す。加速クリープ領域でも短い周期で歪速度一定の区間がある。結晶粒粗大化は歪が5%から8%までの歪加速度最大のところで起こる

2.5時間で遷移クリープから定常クリープに移行するが、31.5 MPaの静水圧下では6時間を要する。定常クリープの持続時間はAでは8時間、Bでは15.5時間と約2倍である。このことは圧縮応力で歪を受けた結晶粒界のいたるところに再結晶が成長するためには、31.5 MPaの静水圧下では大気圧下の2倍の時間を要することを示している。

加速クリープ領域での歪速度は時々刻々に変化するが、Aでは歪が5%から7.5%の間、Bでは5%から8.5%の間で歪加速度が最大になっていることがわかる。前節で、歪7.5%の試料の薄片写真で結晶粒が著しく粗大化していること、また粗大化した結晶の主軸方位が圧縮応力の方向に対して $10^\circ \sim 50^\circ$ の範囲内に集中することを示した。

加速クリープ領域での歪速度と時間の関係は、平均的には実線で示したように、時間とともに歪速度は増すが、実際には点線で示したように歪速度一定の部分と急速に変化する部分が交互に存在することがわかった。この歪速度の階段状の変化は、今までみてきた歪と組織、歪速度の関係から、加速クリープ領域内でも短い周期で再結晶の発生と粗大化が交互に起きていると考えることができる。

#### IV. ま と め

静水圧の下での多結晶氷の圧縮クリープ実験の結果をまとめると次のようになる。

1) 数10 MPaの静水圧下ではクラックの発生を伴わずに20%以上の大きな歪に達した。このため大気圧下のクリープ実験ではみられない減速クリープ現象がみられた。

力学的性質に対する静水圧の効果については、圧力による融点降下分を補正しても、広い歪範囲にわたり静水圧は多結晶氷の変形を妨げた。このことは底面すべりや転位の上昇による

変形に対してのみならず、歪エネルギーを解消するための再結晶粒の発生や、その粗大化に対しても静水圧が作用することを示している。

2) クリープの各段階における歪、組織、主軸方位分布から以下のことが明らかになった。

a. 遷移クリープ：容易すべりの起こる条件を満たす結晶粒でのみ変形が起こる。主軸方位分布に目立った変化はない。

b. 定常クリープ：個々の結晶がいくつかのすべり系によって塑性変形すると同時に、歪を解消するために結晶粒界に再結晶が発生する。

c. 加速クリープ：定常クリープ時に発生した再結晶が急速に粗大化する。この歪領域では歪加速度が最大になった。粗大化した結晶粒の主軸方位は応力軸に対して  $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$  の範囲に集中した。

d. 減速クリープ：加速クリープ時の急速な変形で再び結晶内部や粒界に蓄積された歪エネルギーにより再結晶粒が発生する。歪速度の減少は再結晶の発生による結晶粒の細分化に起因する。

おわりに、本論文を書くにあたり有益な助言をして下さり、また論文の校閲をして下さった応用物理部門 藤野和夫教授に感謝の意を表します。

本実験をおこなうにあたり、種々の部品の作製や装置の性能試験などに新堀邦雄技官ならびに工作部の皆さんのお世話になった。また実験室の温度調節には機関室の方々の御協力を得た。ここに感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Rigsby, G. P. 1958 Effect of hydrostatic pressure on velocity of shear deformation of single ice crystals. *J. Glaciol.* **3**, 273-278.
- 2) Haefeli, R., Jaccard, C. and DeQuervain, M. 1968 Deformation of polycrystalline ice under combined uniaxial and hydrostatic pressure. "I.U.G.G. General Assembly of Bern" IAHS publ. No. **79**, 341-344.
- 3) Jones, S. J. and Chew, H. A. M. 1983 Creep of ice as a function of hydrostatic pressure. *J. Phys. Chem.* **87**, 4064-4066.
- 4) Durham, W. B., Heard, C. H. and Kirby, S. H. 1983 Experimental deformation of polycrystalline  $H_2O$  ice at high pressure and low temperature: Preliminary results. *J. Geophys. Res.* **88**, Supplement, B 377-392.
- 5) 東 信彦 1985 氷の塑性に対する静水圧の効果. 雪氷, **17**(1), 21-26.
- 6) 東 晃・庄子 仁 1979 連続加圧タンク内一軸圧縮試験機による南極氷床深部氷の静水圧下における力学試験. 応用物理, **48**, 41-47.
- 7) Azuma, N. and Higashi, A. 1983 Effect of hydrostatic pressure on the rate of grain growth in Antarctic polycrystalline ice. *J. Phys. Chem.* **87**, 4060-4064.
- 8) Duval, P., Ashby, M. F. and Anderman, I. 1983 Rate-controlling processes in the creep of polycrystalline ice. *J. Phys. Chem.* **87**, 4066-4074.
- 9) 松田益義・木崎甲子郎 1971 多結晶氷の変形実験. 地質学雑誌, **77**(12), 771-778.

### Summary

Polycrystalline ice has been subjected to a compressive experiment under hydrostatic pressure up to 35 MPa at  $-8^{\circ}\text{C}$  and  $-10.5^{\circ}\text{C}$ . It was found that under the hydrostatic pressure of several tens of MPa, polycrystalline ice was easily deformed over a strain of 20% without forming cracks. Microprocesses of creep deformation observed in thin sections showed that the strain of deformation corresponded to creep stages: transient, steady state, accelerative and decelerative.

An application of a hydrostatic pressure of 30 MPa for about 40 hours to an original polycrystalline ice, which had fine air bubbles and a ununiform grain size, made it into an air free ice with a uniform grain size. However, as is shown in Fig. 5, the hydrostatic pressure alone did not change a fabric pattern; that is, it produced no preferred orientation even if the hydrostatic pressure of 35 MPa was applied for a sufficiently long time.

Figure 6 shows typical creep curves of polycrystalline ice under an atmospheric pressure (A) and a hydrostatic pressure of 31.5 MPa (B) at the same temperature below the equilibrium melting point. The figure also shows that a hydrostatic pressure of 31.5 MPa reduced the strain rate by 50%. The same feature was confirmed in all hydrostatic pressures ranging from 10 to 45 MPa in reducing the strain rate.

Creep curves plotted as strain rates against strains at three different stress levels of 1.15 MPa, (E), 1.49 MPa (A, B) and 2.97 MPa (C, D) are shown in Fig. 7. The critical strain corresponding to each stage of creep deformation is evident in this figure; that is, a transient creep continues until the strain reaches to 1%, the steady state which follows the transient creep is kept in the strain limit between 1% and around 2%. As the strain exceeds 2.5%, a accelerative creep begins to start and continues to the strain of 10%, the corresponding strain rate attaining its maximum in creep deformation. A decelerative creep, the strain rate of which lowers with increasing strain, is observed beyond the strain of 10%. The strain range corresponding to the steady state slightly reduced as the stress level increased, as is shown by a dotted line in Fig. 7.

Each of thin sections, a~e, in Fig. 8, corresponds to the typical strain denoted by the same letter on curve E in Fig. 7, showing creep deformation with an axial stress of 1.15 MPa and a hydrostatic pressure of 31.5 MPa. Thin section, a, obtained at the strain of 0.64% shows a texture of the changing point from the transient to the steady state creep. Some changes were found at grain boundaries; that is, some of them seem to diffuse or form zigzags instead of a straight line in an undeformed sample.

Figure 8 b corresponding to a stage of deformation of 1.3% illustrates a typical texture in the middle of a steady state creep. Most of straight grain boundaries have been changed to zigzags; and dynamical recrystallization occurred in several places. At the last stage of the steady state creep, the majority of grain boundaries in between highly strained mother crystals were completely occupied by recrystallized grains, as is seen in Fig. 8 c. From a viewpoint of microprocesses, the steady state creep starts when recrystallization has occurred at some of the strained grain boundaries and become complete when it has replaced all grain boundaries.

It is noticeable that the extreme growth of recrystallized grains takes place during the stage of the accelerative creep, as is shown in Fig. 8 d, which is a thin section of a sample strained by 7.5%.

Fabric pattern of Fig. 9 shows that the majority of c-axes of the grains in an accelerative creep falls in the angle between  $10^\circ$  and  $50^\circ$  with respect to the stress axis.

The fact that the strain rate was lowered as strain increased by more than 10% is caused by smaller grains than those in the accelerative creep appearing in Fig. 8 e. Decrease in the strain rate in the decelerative creep indicates that recrystallization takes place again among strained grains.

It is clear that the most extreme grain coarsening in the accelerative creep occurs at strains ranging from about 5% to 8% where the slope of the curve is the steepest, as is shown in Fig. 10, which illustrates creep curves plotted as strain rates against time.