



Title	多結晶氷の圧縮強度に対する静水圧の効果
Author(s)	水野, 悠紀子; MIZUNO, Yukiko
Citation	低温科学. 物理篇, 52, 1-13
Issue Date	1994-03-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18626
Type	departmental bulletin paper
File Information	52_p1-13.pdf



多結晶氷の圧縮強度に対する静水圧の効果*

水野悠紀子

(低温科学研究所)

(平成5年11月受理)

Abstract : Compressive tests were performed on granular and columnar grained polycrystalline ice, between the strain rates of 3×10^{-4} and $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ and with hydrostatic pressures from 0.1 to 55 MPa, at $-11 \pm 0.5^\circ\text{C}$. An application of a hydrostatic pressure of 5 MPa allowed failure to be brittle to ductile in granular ice and the yield stress increased with strain rate. At $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$, the unconfined strength of 6 MPa rose to 20 MPa with a hydrostatic pressure of 5 MPa. The yield stress changed little with hydrostatic pressure from 5 to 55 MPa at the same strain rate. Brittle fracture occurred in columnar grained ice and the compressive strength at the same hydrostatic pressure above 10 MPa did not change with increasing in strain rate. Effects of hydrostatic pressure on the mode of failure and on the compressive stress are discussed with relations to microprocesses of texture in compression.

要旨 : 大気圧から 55 MPa の種々の静水圧下で $3 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ の定歪速度による純氷多結晶氷の圧縮実験を行い、降伏応力、または破壊強度と歪速度、結晶粒径の関係および、それらに対する静水圧の効果をしらべた。実験温度は $-11 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、試料は結晶学的に等方的な小粒径多結晶氷と柱状多結晶氷である。

小粒径多結晶氷では 5 MPa 以上の静水圧を与えると全歪速度領域で延性破壊を起こし、降伏応力は歪速度と共に増した。大気圧下では歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ における破壊強度は約 6 MPa であったが、同じ歪速度で 5 MPa の静水圧下の降伏応力はおよそ 20 MPa に増大した。しかし、同一の歪速度における降伏応力の値には、静水圧の大小による差はほとんどみられなかった。

柱状多結晶氷では歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ のばあいには、およそ 10 MPa の臨界静水圧で延性破壊と脆性破壊に分かれたが、それより大きな歪速度では静水圧の大小によらず、すべて脆性破壊であった。破壊強度は 10 MPa 以上の静水圧下では、歪速度によらず同一の静水圧で、ほぼ一定の値になった。しかし、5 MPa 以下の静水圧下では、歪速度が増すと強度は減少した。

静水圧はクラックの発生、拡大を抑える働きをするが、破壊強度（降伏応力）の値はかならずしも静水圧に依存しない。強度と静水圧の関係を破壊の微視過程によって説明した。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第 3689 号

keywords: brittle fracture, compressive strength, constant strain rate, ductility, hydrostatic pressure

キーワード: 圧縮強度, 延性, 静水圧, 脆性破壊, 定歪速度

I. 緒 言

静水圧が氷の塑性変形¹⁻⁷⁾や結晶成長⁸⁾に与える影響について多くの研究が行われてきた。それらの結果によると、歪速度が 10^{-6}s^{-1} 以下の転位クリープ領域では、力学的性質に対する静水圧の効果は、 -10°C 以下の温度においては、それほど大きなものではない。しかし、結晶粒の塑性変形と粒界での再結晶の成長とが、同時に起こるような圧力融解点近傍の温度域においては静水圧の効果が大いことが明らかにされている⁹⁾。

氷は歪速度の大小により、脆性と延性の性質を示す。多結晶氷を圧縮するとき、延性破壊から脆性破壊へ移行する歪速度は -10°C で $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{s}^{-1}$ の範囲にあり、この歪速度領域で約 10 MPa の最大破壊強度を示す¹⁰⁾。破壊はクラックが形成され拡大する現象であるから静水圧を受けている氷河、氷床氷を含め、周りから側圧を受ける状態にある自然界の氷の破壊強度は、側圧のない場合より大きいことが期待される。Jones¹¹⁾ は降伏応力、または破壊強度に対する側圧の効果を塑性変形から脆性破壊領域までの広範囲な歪速度について調べ、歪速度が増す程、側圧の影響が大いことを示した。Durham et al.⁴⁾ は低温、高圧下に於ける氷のレオロジーについて実験的研究をおこない、低温度における降伏、破壊強度と側圧の関係を明らかにした。これらの実験はクラックが発生する臨界の応力に対する側圧の効果を明らかにした点で重要である。

自然界の氷の多くは側圧を受けている。その意味で静水圧下で氷の力学実験をすることは、より自然に近い氷の力学条件を再現するという利点がある。静水圧をかけることにより氷の強度が増すのは静水圧がクラックの発生や拡大を抑制することにほかならないが、その事が大気圧下では実現出来ない高歪速度に於ける塑性変形を可能にするばかりでなく、破壊様式にも影響を与える。

氷床氷の深層掘削を含め氷の機械的掘削は、刃先での氷の破壊によって行われる。したがって、掘削速度は氷の破壊強度の圧力依存性の影響を受けるので、深さによって掘削速度がどのように変化するか、また、掘削の際に刃先で発生したクラックがコア内部にどのような影響を与えるかを明らかにすることは、氷床コア掘削の基礎的知識としても重要であろう。

本報告では 55 MPa までの静水圧下で行った高歪速度における圧縮破壊実験の結果について、降伏または破壊強度と粒径及び静水圧の関係、静水圧下の延性、脆性破壊の微視過程について述べる。

II. 実 験

1. 試料

実験には結晶粒径の異なる二種類の純氷多結晶氷を用いた。一つは小粒径氷(granular ice)で粒径 1~2 mm, 密度 $898\sim 905\text{ kgm}^{-3}$ の等方性多結晶氷である。この氷は空隙率にして約 2% の気泡を含んでいる。気泡は $100\ \mu\text{m}$ 以下で主に結晶粒界に存在している。他の一つは粒径 5~10 mm, 長さ約 40 mm の柱状結晶粒からなる多結晶氷(columnar ice)で、密度は 912 kgm^{-3} で、気泡は含まれてない。柱状多結晶氷の結晶主軸の向きは結晶の長軸方向に対して $75\sim 90^\circ$ の間に分布していた。いずれの試料も直径約 40 mm, 長さ約 60 mm の円柱で、成形は旋盤で仕上げ、実験開始まで -10°C で 70 時間以上焼鈍して、試料成形時の歪を取り除いた。柱状多結晶氷では応力軸と結晶の長軸とが平行及び垂直の場合について実験を行った。

2. 定歪速度実験

高压容器を万能材料試験機 (インストロン 4204 型) に設置し、静水圧下で定歪速度による圧縮実験をおこなった。高压容器の詳細は先の報告¹²⁾にあるので省略する。静水圧は油を媒体として氷試料にかけられるが、試料はゴムジャケットで油と隔離されているので、静水圧加圧によって結晶粒界などに油が侵入することはない。容器内の静水圧が所定の圧力で一定になった後、試験機のクロスヘッドを一定速度で降下させ圧縮した。

本実験は脆性破壊に対する静水圧の効果を調べることを目的としたため、小粒径氷では歪速度を $3\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}\sim 2\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ とした。柱状多結晶氷は結晶の長軸と応力軸との関係によって力学的異方性があることはよく知られている。しかし、本実験の遂行の過程で、数 MPa の静水圧が作用し、且つ $1\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 以上の高歪速度になると、柱状結晶の破壊強度が結晶方位には依存しないことが明らかになった。したがって、柱状多結晶氷については異方性がなくなる高歪速度の $2\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}, 1\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}, 2\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ とした。

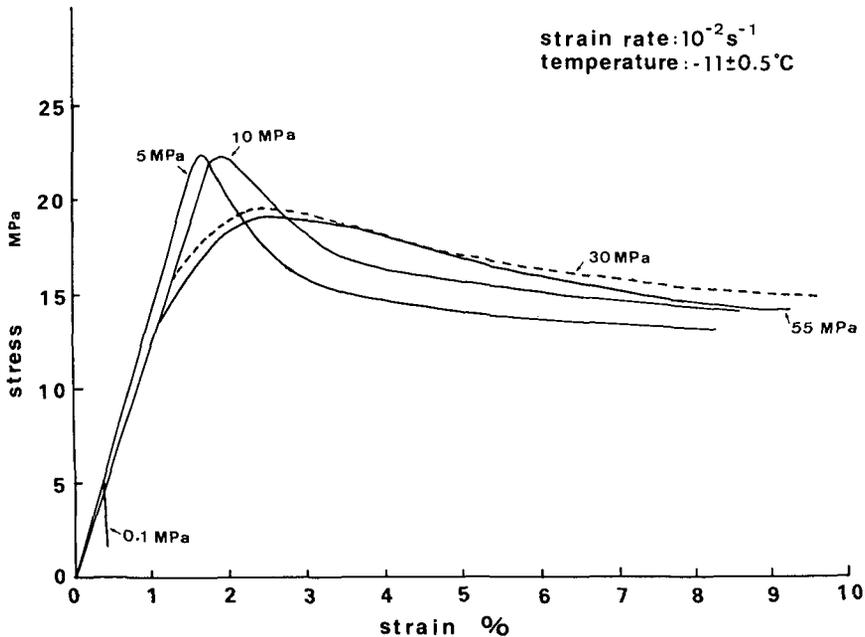
III. 結 果

1. 圧縮強度と歪速度, 静水圧

a. 小粒径多結晶氷

第 1 図に小粒径多結晶氷を実験温度 $-11\pm 0.5^\circ\text{C}$ で、種々の静水圧をかけながら歪速度 $1\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ で圧縮して得られた応力-歪曲線の例を示す。小粒径多結晶氷では、 10^{-2} s^{-1} の高歪速度の圧縮に対して、5 MPa 以上の静水圧を与えると、みかけ上、延性的に破壊した。ここで延性的とは応力-歪曲線に於て最大応力に達するまでの応力-歪の関係が非線形で、降伏応力に対応する歪に幅があり、応力緩和が緩やかに起こることで定義した。これに対して 0.1 MPa の応力-歪曲線では、歪と応力は比例し、歪が約 0.4% で最大応力 5 MPa で破壊し、急激な応力の低下を示す。このような応力-歪曲線を示す場合を脆性破壊であるとした。

小粒径多結晶氷では $3\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ から $2\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$ の全歪速度で、5 MPa 以上の静水圧を加圧

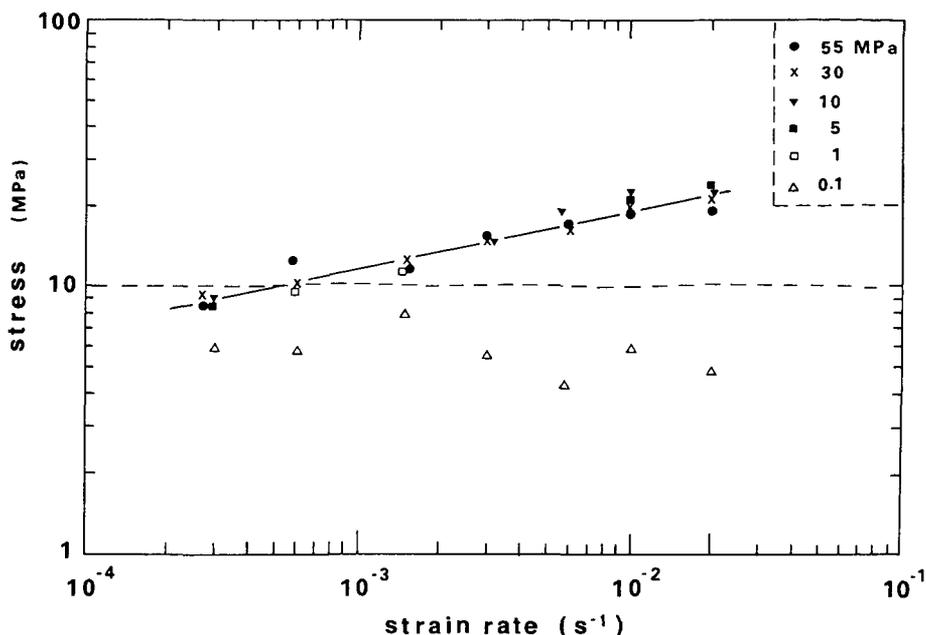


第1図 種々の静水圧における小粒径多結晶水の応力-歪曲線：歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ，
温度 $-11 \pm 0.5^\circ\text{C}$

すると応力-歪曲線は図1のような延性破壊曲線を示した。

第2図は実験温度 $-11 \pm 0.5^\circ\text{C}$ で種々の静水圧下に於ける降伏応力と歪速度を両対数グラフにプロットしたものである。マークは図中に示した静水圧を、各点の値は同一条件で行った3試料の測定値の平均である。小粒径多結晶試料95個のうち93試料について示した。

側圧のない場合、延性限界の歪速度はおよそ $3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ で、それより大きな歪速度では脆性破壊を起こした。大気圧下に於いては、本実験の全歪速度領域で、破壊強度はおよそ $5 \sim 6 \text{ MPa}$ であった。これに対して 5 MPa 以上の静水圧をかけると降伏応力は歪速度の増大とともに増し、歪速度が $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ では側圧のない場合の約4倍の応力を示した。このように降伏応力に対する静水圧の効果は歪速度が大きくなるほど顕著になる。降伏応力に影響を与える静水圧の大きさは、歪速度にも依存する。例えば $6 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 、 $1.5 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ の低歪速度では 1 MPa の静水圧で降伏応力は側圧のない場合の破壊強度の $1.5 \sim 2$ 倍になった。これは側圧をかけることによって、脆性破壊から延性破壊に移行したことに対応する。したがって、より大きな歪速度では脆性から延性への移行にはより大きな静水圧を必要とする。本実験の全歪速度領域に於て、少なくとも 5 MPa の静水圧をかけることにより、脆性破壊から延性破壊に移行し、それぞれの歪速度における降伏応力は静水圧の大小には殆ど依存しないことが明らかになった。歪速度によっては静水圧 5 MPa 、または 10 MPa の降伏応力が 30 、 55 MPa の場合より大きくなることもある。これは第1図の応力-歪曲線においても明らかで、僅かではあるが降伏応力は静水圧が小さい順に大きくなっている。また、降伏応力に対応する歪や、応力緩和時間が静水圧に依存することは、応力の負荷過程、及び緩和過程に静水圧が影響を与えていることを示している。



第2図 小粒径多結晶氷の歪速度と降伏応力の関係

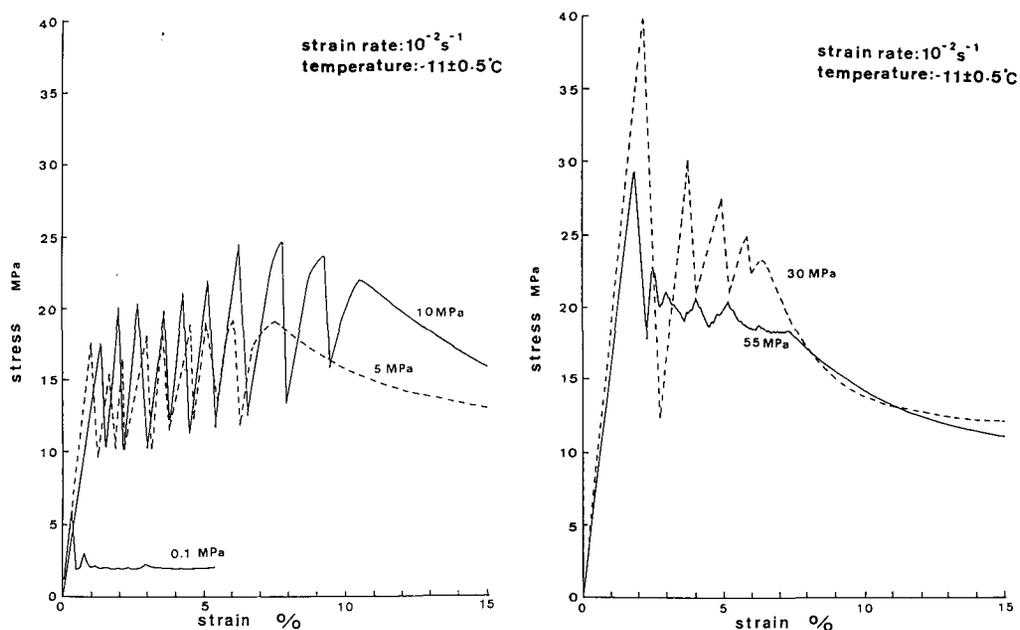
破壊の微視過程と静水圧の影響については後で述べる。

降伏応力と歪速度の間には、5 MPa以上の静水圧に対して、第2図に示した直線関係がみられた。これは大気圧下で脆性破壊を起こす高歪速度範囲においても、静水圧を加圧することによって、降伏応力 σ と歪速度 $\dot{\epsilon}$ の間に $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ の流動則が成り立つことを示している。ここで、 A , n は定数である。加圧静水圧5~55 MPa, 歪速度範囲 $3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \sim 2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ で $n=3.7$ となった。

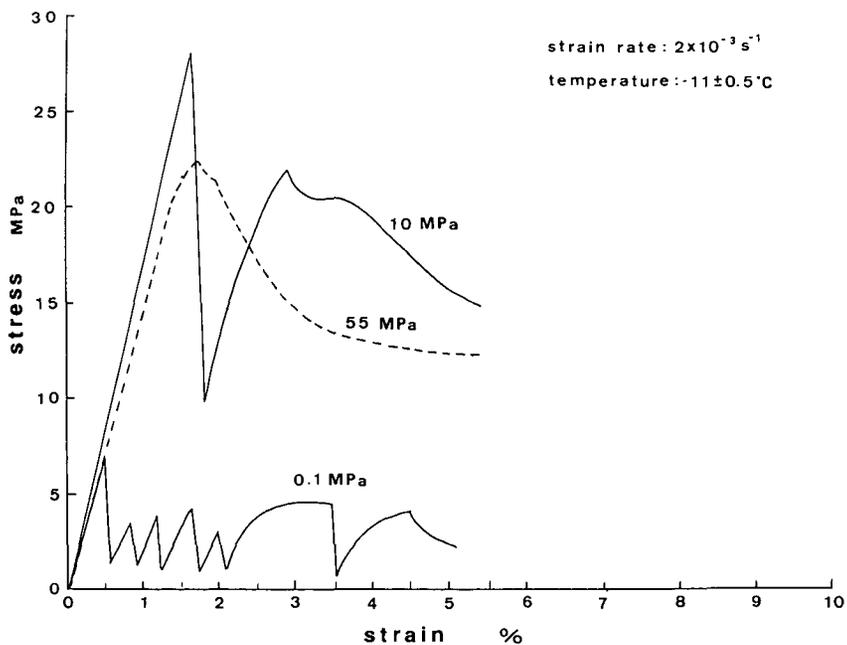
b. 柱状多結晶氷

柱状多結晶氷の圧縮実験は、歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$, $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$, $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ でおこなった。このような高歪速度の破壊に対しては柱状結晶特有の異方性はない。第3図に種々の静水圧下で、歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ で圧縮したときの応力-歪曲線を示す。小粒径多結晶氷(第1図)とは異なり、柱状多結晶氷は鋸歯状の破壊曲線を示した。破壊に至るまでの応力と歪は比例関係にある。大気圧下では歪0.3%で破壊し、急速に応力が低下した。静水圧55 MPaでは歪1.9%で最大応力に達し、急速な応力緩和を示すが、その他のピークの応力緩和は緩やかである。静水圧5, 10, 30 MPaについて比較すると、静水圧が小さい程、一定の歪の間に起こる破壊の回数が多いことが分かる。柱状多結晶氷の応力-歪曲線をみると、5%の歪に至るまでに複数回のクラック発生による破壊があり、歪6~7%で緩やかに応力を緩和する。破壊強度としては応力の最大値をとった。

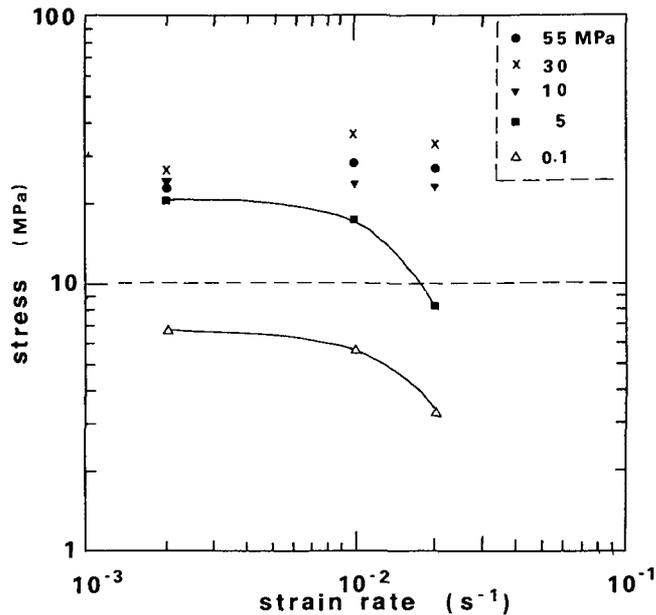
第4図は歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ で0.1 MPa, 10 MPa, 55 MPaの静水圧下に於ける応力-歪曲線



第3図 種々の静水圧における柱状多結晶氷の応力-歪曲線：歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ，温度 $-11 \pm 0.5^\circ\text{C}$



第4図 歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ で柱状多結晶氷を圧縮したときの応力-歪曲線，静水圧 0.1, 10 MPa で脆性破壊，55 MPa で延性破壊である



第5図 柱状多結晶氷の破壊強度と歪速度の関係。10 MPa以上の静水圧下で破壊強度は歪速度に依存しないが5 MPa以下では歪速度が増すと強度は減少する

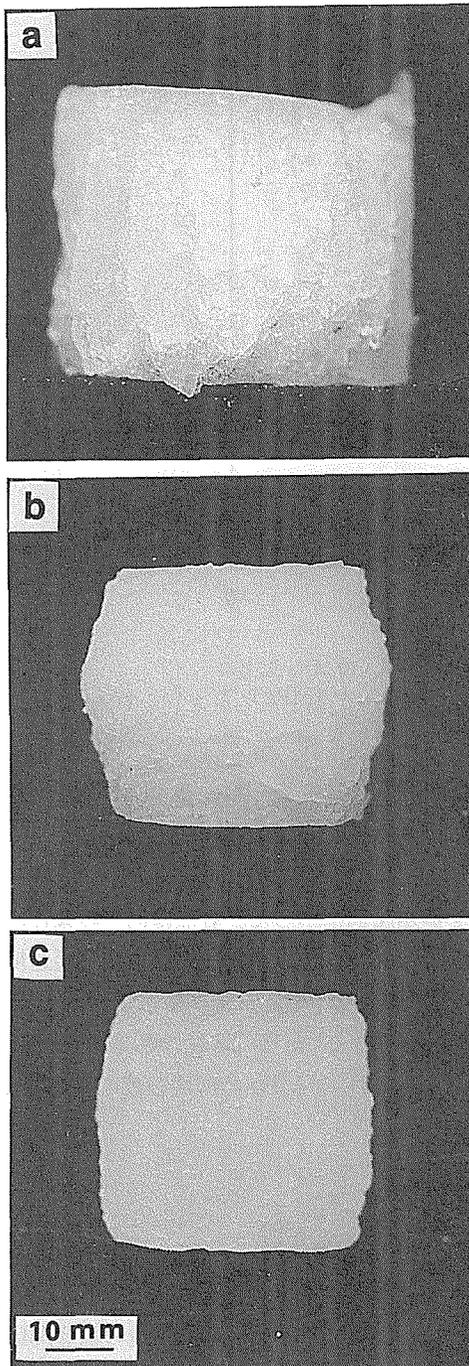
である。この歪速度は静水圧によって破壊様式が異なる臨界の速度で、およそ10 MPaが脆性と延性を分ける静水圧である。この歪速度においては静水圧によって破壊様式は異なるが、それぞれの最大応力を破壊強度とした。

第5図に柱状多結晶氷の破壊強度と歪速度の関係を静水圧別に示した。各点は同一の条件における3試料の平均である。加圧静水圧10, 30, 55 MPaについてみると、破壊強度は歪速度に依存せずに、ほぼ一定である。しかし、側圧のない場合(0.1 MPa)、および静水圧5 MPaでは歪速度が増すにつれ、破壊強度は減少した。また、歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ では静水圧の大小によらず脆性破壊で、いずれの歪速度においても静水圧30 MPaの破壊強度が55 MPaの強度より大きな値を示した。

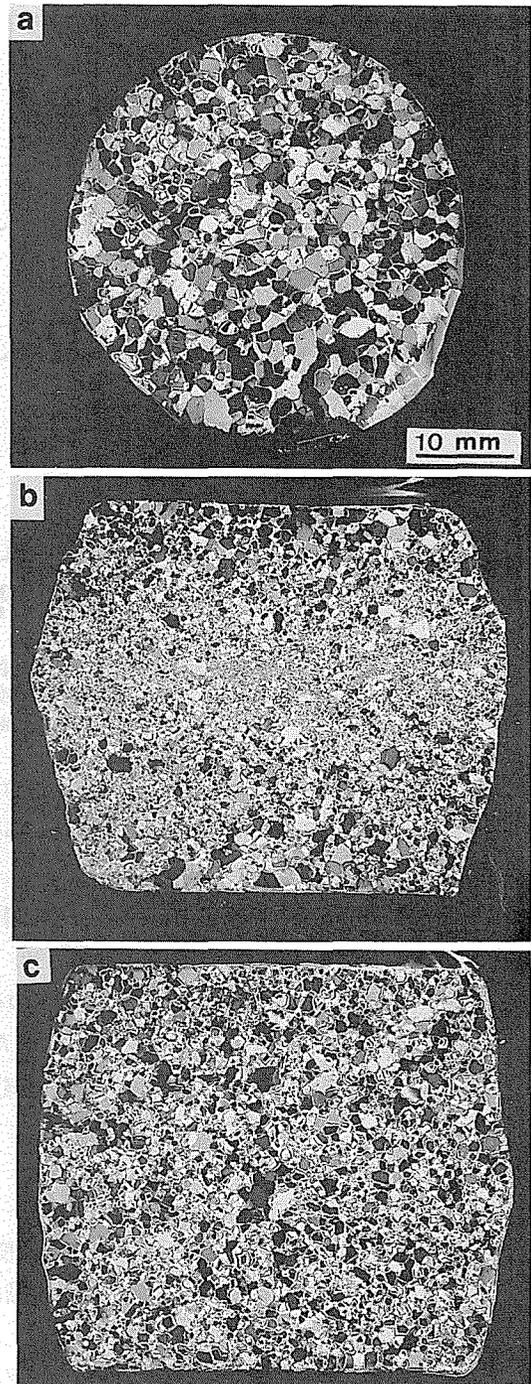
2. 破壊の微視過程に対する静水圧の効果

第1図及び第3図に示したように、同一の歪速度で応力-歪曲線の形は、粒径や静水圧によって異なる。第1図で明らかなように、小粒径多結晶氷では加圧静水圧が大きいほど、破壊や降伏を起こす歪が大きいことを示している。また、氷のような粘弾性体では応力-歪の線形関係は歪の小さい領域でしか成り立たないので、歪速度によっては、この例のように加圧静水圧が小さいほど降伏応力が大きく、応力の緩和時間は短い。ここでは加圧静水圧による応力-歪曲線の違いが試料の外観や結晶組織の変化とどのように対応しているのかについて述べる。

第6図のa, b, cはそれぞれ第1図の応力-歪曲線で静水圧0.1, 10, 55 MPaに対応する試



第6図 圧縮変形後の小粒径多結晶氷。歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ a : 0.1 MPa, b : 10 MPa, c : 55 MPa



第7図 小粒径多結晶氷の薄片 a : 変形前, b, cはそれぞれ第6図b, cの圧縮軸に平行な面の薄片

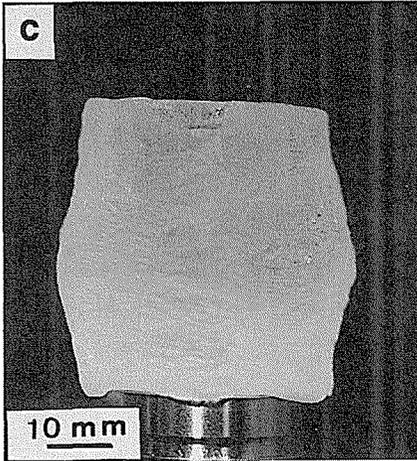
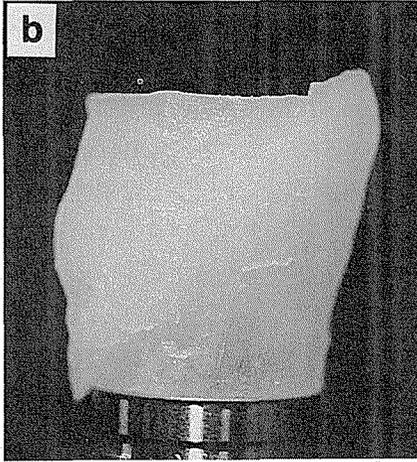
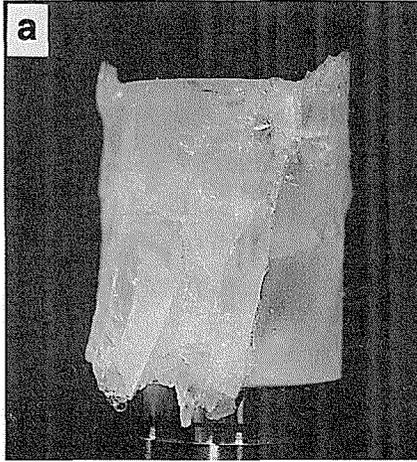
料の写真である。圧縮方向は写真の上下の方向である。aは脆性破壊、b、cは延性破壊で、いずれも最終歪は約25%である。

静水圧10 MPaの写真bでは中心部の変形が特に大きく、この部分は微小クラックの集中のため肉眼でも白濁して見える。また試料の表面に凹凸を生じるような亀裂も観察された。一方、静水圧55 MPaでは10 MPaの場合に比べて試料中心部の歪は小さく、クラックによる試料内部の白濁も少なかった。

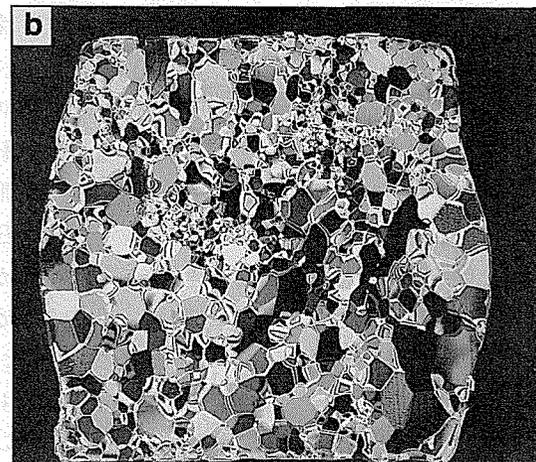
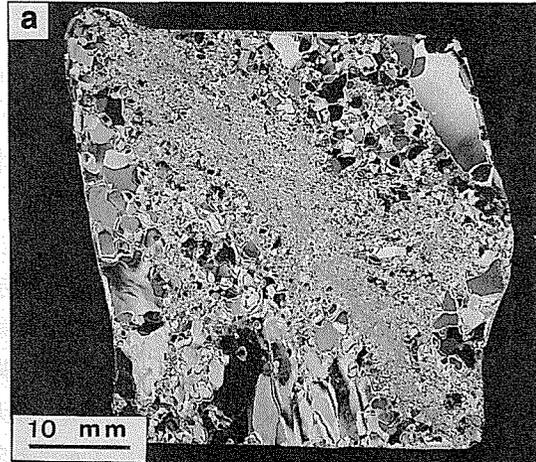
第7図b、cは、第6図b、cに示したそれぞれの試料の圧縮方向に平行な薄片写真である。組織の比較のために、変形前の薄片を第7図aに示した。写真aは圧縮軸に垂直な断面の薄片であるが、試料は等方的なので圧縮方向の組織も同じと考えてよい。写真a、bを比較すると、bでは上下面を底辺とする三角形の領域の結晶組織は、変形の前後で殆ど変化していないが、二本の対角線で囲まれた領域の組織は変形前とは大きく異なっているのが分かる。これは変形が主に最大剪断応力面内での破壊滑りによることを示している。この場合、滑り面は複数で、そこで生じたクラックに沿った再結晶によって、変形領域内の結晶組織は、圧縮前とは異なる小結晶粒組織に変化した。

第7図cでも同様に最大剪断面に対応する二本の対角線に沿って組織の不連続帯が見られるがその範囲は狭い。さらに変形前と比べ全体的に結晶粒が小さくなっている。これは最大剪断応力面以外に於いても、試料が均一に塑性的に変形したことを示す。大気圧下では脆性破壊を起こすような高歪速度の圧縮変形に於いて、静水圧を加圧することにより、クラックの発生や成長が抑制され、滑り面の数、または、滑り帯域が静水圧の増大にともなって減少する。その結果、加圧静水圧が大きくなるほど延性的な性質が表れる。

柱状多結晶氷の応力-歪曲線は第3図に示したように鋸歯状の破壊曲線である。第3図の0.1, 5, 55 MPaに対応する試料を、第8図a、b、cにそれぞれ示した。写真b、cの最終歪はいずれもおよそ25%である。静水圧0.1 MPaでは写真aから明らかなように脆性破壊である。静水圧5 MPaでは、変形後の試料には多数のクラックが見られ、特に応力軸とおよそ45°をなす広い範囲が白濁し不透明になった。また試料の表面に凹凸を生じる大きなクラックも観察された。静水圧55 MPaでは、写真cから明らかなように、クラックの成長が妨げられるので、最大剪断応力面内で優先的に起こる変形が抑制される。この結果、低静水圧の場合に比べて変形は均一に起こり、試料の透明度も保たれている。第8図b、cの試料の薄片写真を第9図a、bに示した。写真aでは最大剪断応力面を中心とした広い範囲に、再結晶による組織の変化が見られる。薄片写真bにも最大剪断応力面と平行に、部分的な組織の変化が見られるが、aの場合のように変形帯が試料を貫通するほどには成長発達していない。このように、静水圧の増大にともない、最大剪断応力面内での優先的な滑りやクラックの発生による脆性的変形の他に、塑性変形も起きていることを示している。



第8図 圧縮変形後の柱状多結晶氷。歪速度 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$, a : 0.1 MPa, b : 5 MPa, c : 55 MPa



第9図 圧縮変形後の柱状多結晶氷の薄片 a, bはそれぞれ第8図b, cに示した試料の圧縮軸に平行な面の薄片

IV. 考察とまとめ

0.1 から 55 MPa の種々の静水圧下で定歪速度による多結晶氷の圧縮実験をおこない、静水圧が破壊強度（降伏応力）や破壊過程にどのような影響を与えるかをしらべた。試料は粒径の効果を調べるために、小粒径、無定方位多結晶氷と柱状多結晶氷を用いた。歪速度は小粒径多結晶氷では $3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1} \sim 2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 、柱状多結晶氷では力学的な異方性がなくなる高歪速度域の $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 、 $2 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ の三つの歪速度である。歪速度と降伏応力または破壊強度（応力-歪曲線の最大応力）の関係及びそれらに対する静水圧の効果は以下のように結論された。

1) 小粒径多結晶氷は側圧のない場合 (0.1 MPa) には歪速度 $3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ では延性破壊をするがそれより大きな歪速度では脆性破壊を起こし、破壊強度は歪速度に依存しなかった。しかし、静水圧 5 MPa を与えることで、上記の全歪速度領域で延性破壊になり、降伏応力は歪速度の増加と共に増した。同一の歪速度に於ける降伏応力には、静水圧の大小による差はほとんどなく、5~55 MPa の静水圧に対して降伏応力と歪速度の間には応力指数 $n=3.7$ の関係が見られた。しかし、歪速度が大きくなると低静水圧ほど降伏応力が大きくなる傾向が見られた。

2) 柱状多結晶氷は歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ で、静水圧の大きさによって延性破壊と脆性破壊に分かれたが、それより大きな歪速度では、静水圧の大きさによらず脆性破壊をした。静水圧 5 MPa に於ける破壊強度は静水圧を与えない場合と同様に、歪速度とともに減少した。静水圧 10, 30, 55 MPa の破壊強度は、それぞれの静水圧では歪速度に依存せずほぼ一定の値を示した。但し、破壊強度は静水圧と共に増すのではなく、本実験の歪速度範囲では 55 MPa より 30 MPa に於ける強度の方が大きな値を示した。

以上の結果をもとに粒径による破壊様式の違い、破壊強度と歪速度及びそれらに対する静水圧の効果について考察する。

1) 結晶粒径と破壊

同一の歪速度、静水圧で小粒径多結晶氷が延性破壊を、柱状多結晶氷が脆性破壊をすることは結晶粒径が破壊様式を分ける要因であることを示している。

結晶粒径が破壊におよぼす直接的な要因としてクラックの大きさと粒界の数が考えられる。発生するクラックの数はおもに歪速度に依存する¹⁰⁾ので、小粒径多結晶氷が延性破壊であるということは結晶粒界がクラックの成長を止め、脆性破壊に至るような大きなクラックが形成されないことを示している。個々の結晶粒で生じたクラックの長さが結晶粒径の程度とすれば、結晶粒内で発生するクラックの長さは、小粒径多結晶氷では 1~2 mm、柱状多結晶では 5 mm 以上数 10 mm である。変形によって結晶内に発生するクラックの大きさが、結晶粒径の異なる小粒径多結晶氷と柱状多結晶氷とで異なることが破壊様式を分ける重要な要因であることが、実験結果から裏付けられる。

2) 破壊強度に対する静水圧の効果

破壊様式に関係なく、静水圧を加えると破壊強度（降伏応力）は増大した。これは静水圧がクラックの発生、拡大を抑制することにほかならない。破壊強度に影響を与える静水圧の大き

さは、温度を一定にした場合、歪速度と氷の結晶組織に依存する。例えば第2図に示したように、小粒径多結晶氷では 10^{-3}s^{-1} 前後の低歪速度域に於いては、降伏応力に対して、わずか1 MPaの静水圧が、数10 MPaの静水圧と同程度の効果を与える。ただし全歪速度域で降伏応力を増大するためには5 MPa以上の静水圧が必要である。

柱状多結晶氷では、第5図に示したように、歪速度 $2 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ では5 MPaの静水圧下の破壊強度は約20 MPaで、静水圧を加えない場合の破壊強度の約3倍である。さらに、この歪速度では、静水圧の大小による破壊強度の差は小さい。しかし、歪速度の増大にともない、静水圧5 MPaに於ける破壊強度が急速に減少するのに対し、静水圧10, 30, 55 MPaにおける破壊強度は歪速度によらず、静水圧ごとに、ほぼ一定の値である。以上のことはクラックの拡大を抑制し、破壊強度（降伏応力）を増大させる静水圧の臨界値が歪速度、結晶粒径に依存することを示している。

破壊強度は必ずしも静水圧の大小には依存せず、柱状多結晶氷では、いずれの歪速度においても加圧静水圧30 MPaにおける破壊強度が55 MPaにおける強度より大きな値を示した。このような静水圧と破壊強度の逆相関は、応力-歪曲線（第3図）の形や、薄片写真から分かるように、加圧静水圧がクラックの発生、拡大を抑制するのに十分な大きさであれば、破壊は延性的になり、みかけの破壊強度は小さくなる。

小粒径多結晶氷の場合にも、高歪速度域で、静水圧と降伏応力の逆相関の関係がみられた。これは、5 MPaまたは10 MPaの低静水圧下においても、応力-歪曲線は延性破壊の様相（第1図）を示すが、結晶組織（第7図b）を見ると明らかに、破壊の過程は脆性的である。小粒径多結晶氷の場合、歪速度の増大にともない、低静水圧下の破壊が延性から脆性に移行するのに対し、高静水圧下の破壊が延性的であるために、高静水圧下の降伏応力が小さくなる。したがって、このような破壊強度と静水圧の見かけ上の逆転現象は、破壊様式が静水圧に依存しなくなる高歪速度、および、低温度領域では見られなくなることが予測される。

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 H₂O ice at high pressure and low temperature: Preliminary results. *J. Geophys. Res.*, **88**, Supplement, B 377-392.
- 5) 東信彦 1985 氷の塑性変形に対する静水圧の効果. 雪氷, **17**, (1), 21-26.
- 6) 東兎・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) Mizuno, Y. 1992 High temperature creep of polycrystalline ice under hydrostatic pressure. in "Physics and Chemistry of Ice" ed. by N. Maeno and T. Hondoh, Hokkaido Univ. Press., 434-439.

- 8) 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.
- 9) 水野悠紀子 1990 圧力融解点近傍における多結晶氷の変形と静水圧の効果. 低温科学, 物理篇, **49**, 75-80.
- 10) Gold, L.W. 1977 Engineering properties of fresh-water ice. *J. Glaciol.*, **19** No. 81, 197-212.
- 11) Jones,S.J. 1982 The confined compressive strength of polycrystalline ice. *J.Glaciol.*, **28**, No. 98, 171-177.
- 12) 水野悠紀子. 鈴木義男 1988 静水圧下での多結晶氷のクリープ実験. 低温科学, 物理篇, **47**, 1-13.