



Title	圧力融解点近傍に於ける多結晶氷の変形と静水圧の効果
Author(s)	水野, 悠紀子; MIZUNO, Yukiko
Citation	低温科学. 物理篇, 49, 75-80
Issue Date	1991-03-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18596
Type	departmental bulletin paper
File Information	49_p75-80.pdf



Yukiko MIZUNO 1990 Short Report: Deformation of Polycrystalline Ice and Effect of Hydrostatic Pressure on the Creep Rate at Temperatures Close to the Pressure Melting Point. *Low Temperature Science, Ser. A, 49.*

圧力融解点近傍に於ける多結晶氷の変形と静水圧の効果*

水野悠紀子
(低温科学研究所)
(平成2年10月受理)

I. はじめに

温暖氷河の内部や底面はもとより、極地の氷河や氷床に於いてもその深部の氷は静水圧のために圧力融解点近傍にあるといわれる。Rigsby¹⁾は高圧下で単結晶の剪断実験を行い、歪速度に対する静水圧の効果調べた。その結果、氷の温度と圧力融解点との温度差が等しい場合には歪速度に差がないことから単結晶の塑性変形に対しては静水圧の効果がないと結論した。しかしながら、結晶粒界を含む多結晶氷の塑性変形に対してはその限りではないと考えられる。特に、圧力融解点近傍では多結晶氷の変形は個々の結晶粒の変形と結晶粒界での再結晶による急速な組織の変化を伴うので、変形に対する静水圧の効果が大いと考えられる。結晶粒の成長に対する静水圧の効果については Azuma, Higashi²⁾, 及び水野, 鈴木³⁾の実験があり、いずれも静水圧が結晶粒の成長を促進することを示した。一方、静水圧と多結晶氷の力学的な性質の関係についての実験的研究は人工多結晶氷^{3~6)}や氷河、氷床氷^{7,8)}を用いて行われてきた。しかし、静水圧が多結晶氷の変形速度や強度に及ぼす影響については研究者により異なる結果を得ている。これは変形速度や温度、試料が実験結果に複雑に影響することを示すものであるが、多結晶氷の力学的な性質に対する静水圧の効果を変形速度や温度領域によって異なることも考えられる。

筆者は氷床深部氷のような高温高圧状態の多結晶氷の変形過程と変形に対する静水圧の効果調べを目的として、圧力融解点との温度差が0.4~8°Cの高温領域で圧縮クリープ実験を行った。

実験結果から15%までのすべての歪領域で結晶粒の塑性変形と結晶粒界に於ける再結晶の成長が同時に進行していること、また、圧力融解点と実験温度との差が等しい場合には静水圧が大いほど定常クリープ速度が減少することが明らかになった

II. 実 験

実験には一定の規格化した人工多結晶氷の試料を用いた。人工多結晶氷の作り方は次のようである。しまり雪をほぐしてふるい分けした粒径0.5~1 mmの雪粒を直径40 mm、長さ

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3404号

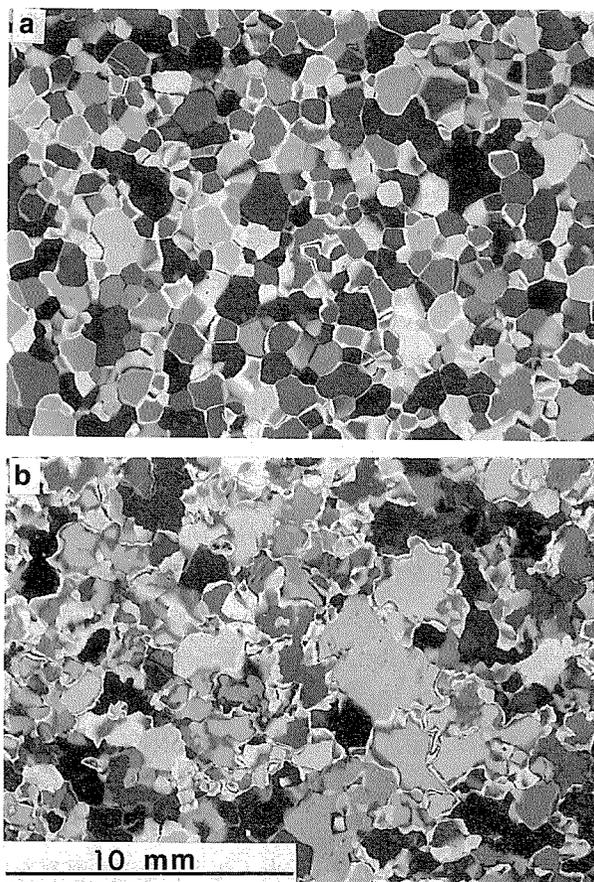
120 mm の円筒容器に入れてタッピング圧縮して固め、それに 0°C の蒸留水を浸み込ませて凍結させた。これまでの実験から³⁾、粒径が均一で気泡を含まない多結晶を得るために雪ごおりに -10°C の温度で 30 MPa の静水圧を 50 時間以上負荷した。このようにして作った多結晶氷では 80% 以上の結晶粒が粒径 1~2 mm の範囲にあり、個々の結晶粒の主軸方位分布は無秩序配位であった。試料の形状と大きさは直径 40 mm、長さ 60~80 mm の円柱である。このような一定の初期条件を満たした多結晶氷を高圧容器に入れ、実験温度と静水圧とを変化させ圧力融解点との温度差が 0.4~8°C ($\pm 0.1^\circ\text{C}$) の範囲の高温領域で、一軸圧縮クリープ実験を行った。偏差応力は 1 MPa である。

III. 結 果

1. 高温クリープにおける歪と組織

第 1 図に実験の前後の試料の結晶組織の薄片写真を示した。写真 a は変形前の、b は実験温度 -5.7°C、静水圧 35 MPa (圧力平衡融点からの温度差 3.1°C) に於て歪 2.8% を与えた試料の薄片写真である。第 1 図 a, b を比較すると、変形後の写真 b では結晶粒界が複雑に屈曲し、さらに光学的に不明瞭になったこと、及び結晶粒径が不均一になったことが分かる。結晶粒径は変形前には 1~2 mm であるのに対して変形後の結晶粒径は 0.2~5 mm まで広い分布を持つ。大きな結晶粒は急速に成長した再結晶粒であり、結晶粒界にある小さな結晶粒は成長初期の再結晶粒である。このことは圧力融解点近傍での多結晶氷の変形には結晶粒の塑性変形、粒界に於ける再結晶核の発生と成長といういくつかの機構が同時に作用していることを示している。

圧力融解点との温度差が 10°C 以上の場合には歪と組織との間には一定の関係があり、再結晶粒が成長する歪領域は加速クリープ領域に限られていた³⁾。しかし、温度差が 7°C 以下の高温では全ての歪領域で再結晶粒が成長するため、歪と組織との間の一一定の関係は見られなくなる。



第 1 図 a: 変形まえの多結晶氷の薄片写真
b: 実験温度 -5.7°C、静水圧 35 MPa、偏差応力 1 MPa で圧縮歪 2.8% を与えた後の薄片写真

2. クリープ歪と静水圧

第2図に圧力融解点直下で行った圧縮クリープ曲線を示す。偏差応力はいずれも1 MPaである。各曲線に示した温度は実験温度、圧力はクリープ実験中の静水圧である。H. T. は静水圧による融点降下を考慮した実験温度の融点相当温度 (homologous temperature) である。曲線 #74, #75 は実験温度が等しく相当温度が異なる場合のクリープ曲線で、#75, #76 は実験温度は異なるが相当温度が等しい場合である。第2図から10時間後の歪を求めると、#76 が11.5%、#75 が6.6%、#74 は3.6%となる。また、同図から明らかのように、高温クリープに於いても -10°C 以下の温度の多結晶氷のクリープと同様に定常クリープを

示す歪領域は1%前後であることに変わりはない。但し高温になるほど定常クリープの継続時間は短くなる。それぞれについての定常クリープ速度は#76 が $1.20 \times 10^{-6}/\text{s}$ 、#75、#74 はそれぞれ $8.15 \times 10^{-7}/\text{s}$ 、 $6.80 \times 10^{-7}/\text{s}$ である。

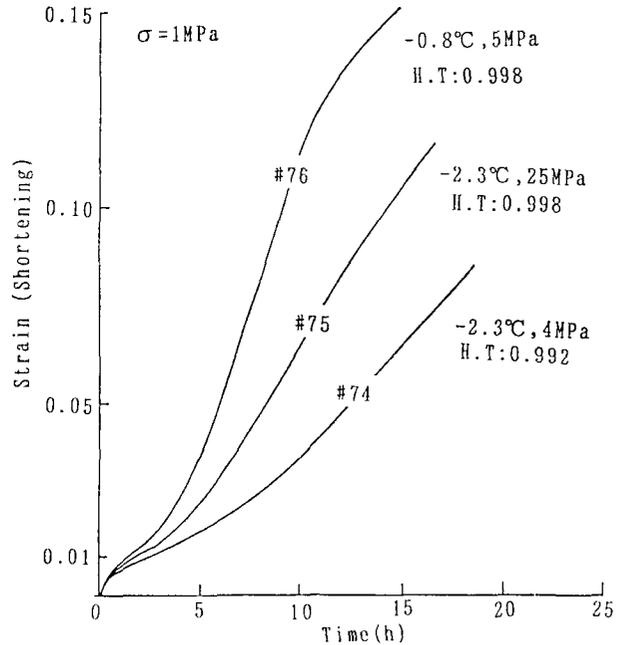
以上のことから圧力融解点近傍では実験温度 (氷の温度) が等しい場合には静水圧の大きい方が変形し易く、また、同一の相当温度のもとでは静水圧が大きいほど変形し難くなるということが出来る。

3. 定常クリープ速度に対する静水圧の効果

先に述べたように実験温度が等しい場合には、静水圧の大きい方が変形し易い。これは、静水圧による融点降下のために実験温度と平衡融解点との温度差が小さくなるためである。従って、クリープ速度に対する静水圧の効果を知るためには同一の相当温度に於いて比較する必要がある。第3図に定常クリープ速度 (最小クリープ速度) と $1/T$ との関係を示す。ここで T は実験温度と静水圧で決まる相当温度を1気圧に於ける同一の相当温度の絶対温度で示した。例えば $1000/T=3.70$ は相当温度では0.99になる。また図の中でAは静水圧が4~5 MPa、Bは静水圧35 MPaの定常クリープ速度対 $1/T$ の関係である。静水圧が作用している時の定常クリープ速度は次式で表される。

$$\dot{\epsilon}_{\min} = A\sigma^n \exp(-Q/RT)$$

ここで $Q=E+pV$ は活性化エンタルピー、 E 、 V はそれぞれ活性化エネルギーと活性化体積、



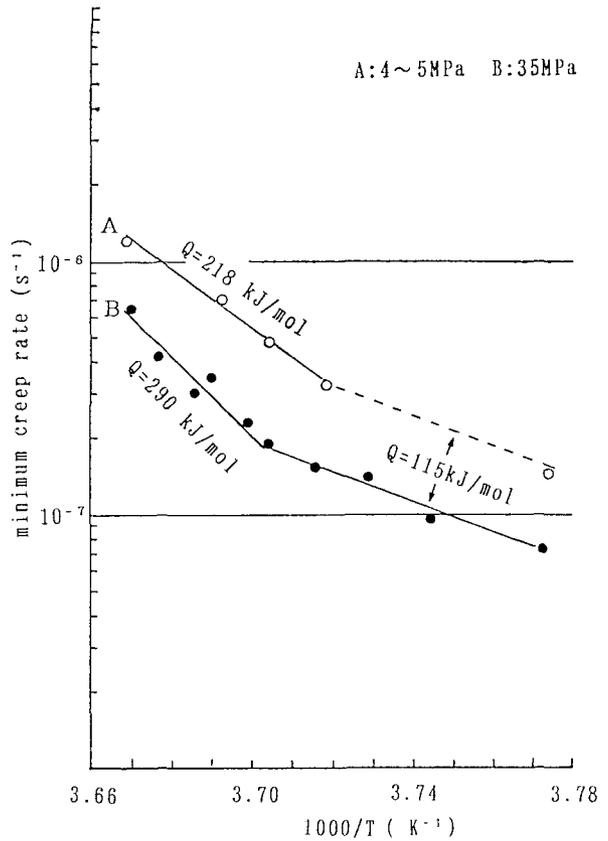
第2図 圧力融解点直下の圧縮クリープ曲線。偏差応力 (σ) は1 MPa。#74, #75の組は実験温度は等しいが相当温度が異なる場合、#75, #76は実験温度が異なり、相当温度が等しい場合

p は静水圧, A, n は定数である。第3図から明らかなように, 活性化エンタルピー Q は $1000/T$ が 3.7 以下の圧力融解点直下で静水圧の効果が顕著になり, 静水圧 4~5 MPa では約 220 kJ/mol, 35 MPa では 290 kJ/mol という値を得た。この値はいずれも 1 気圧のもとで -10°C 以上の高温クリープの活性化エネルギー⁹⁾, 120~130 kJ/mol に比べてかなり大きい。しかし $1000/T$ が 3.7 以上では活性化エンタルピーに対する静水圧の効果は見られなくなる。同時に活性化エンタルピーの値も 115 kJ/mol で大気圧下に於ける多結晶氷のクリープの活性化エネルギーの値とほぼ等しい値になった。

IV. 考察とまとめ

これまでの研究で多結晶氷の力学的性質は 1 気圧の下では, -10°C 付近を境に高温側と低温側で大きく異なることが指摘されている。例えば, クリープの活性化エネルギーは

-10°C 以下では 60 kJ/mol であるが, -10°C 以上では 120~130 kJ/mol である。これに対して単結晶氷では $-50\sim 0^{\circ}\text{C}$ の間でクリープの活性化エネルギーは 60 kJ/mol と一定の値をとる⁹⁾。したがって, -10°C 以上の高温度に於ける単結晶と多結晶の活性化エネルギーの差は結晶粒界に起因すると考えてよい。高温側で活性化エネルギーが大きくなる理由として定常クリープ速度が $10^{-7}/\text{s}\sim 10^{-6}/\text{s}$ になるような応力範囲であっても, 変形が転位の運動という単一の機構によるのではなく, 複数の機構が働く結果であるといわれている¹⁰⁾。転位以外の変形機構としては結晶粒界に於ける再結晶の成長が考えられる。実際に圧力融解点近傍でクリープ実験をして歪と組織を調べると, -10°C 以下で明瞭であった歪と組織の対応は見られなくなる。我々は先に -10°C 以下の温度で同様の実験を行い, 歪 15% までの間に遷移, 定常, 加速, 減速の四段階のクリープ領域を経過すること, 及びそれぞれのクリープに対応する歪領域が応力によらず一定であり, さらに歪と結晶組織との間にも一定の関係があることを示した³⁾。この場合定常クリープは歪が 1~2.5% の一定領域に対応し, ここでは結晶粒の塑性変形による結晶粒界への応力集中, 歪エネルギーの蓄積が行われ, 再結晶粒が急速に成長するのは加速クリー



第3図 定常クリープ速度と $1/T$ の関係。A: 静水圧 4~5 MPa, B: 静水圧 35 MPa。偏差応力 1 MPa。活性化エンタルピー Q は $1000/T$ が 3.7 以下の圧力融解点直下で静水圧の依存性が顕著になる。

領域のみに限られていた。これに対して今回行った圧力融解点近傍の実験ではどの歪領域に於いても結晶粒の塑性変形と再結晶の成長とが同時に進行している。このため、歪と組織との対応は失われている。このことは圧力融解点付近のクリープ変形に再結晶の成長が重要な役割を果たしていることを示している。Jones と Chew⁵⁾ らは単一の温度で 60 MPa までの静水圧下でクリープ実験を行いクリープ速度に対する静水圧の効果を調べた。彼らの結果では静水圧が 15 MPa 以下では静水圧の増加に伴いクリープ速度が減少し、それ以上の静水圧に対しては静水圧が大きいほど速度は増した。

我々の実験結果にもとづいて Jones らの結果を解釈すると 15 MPa 以上の静水圧領域については融点降下の影響と考えることが出来る。すなわち静水圧 15 MPa と 50 MPa では平衡融点と実験温度 (-9.6°C) との差に於いて 2.5°C 以上の違いがあるために 50 MPa で約 2 倍のクリープ速度になることは当然の結果であろう。但し、今回のように同一の相当温度に於ても同様の静水圧効果が見られるかどうかは疑問である。筆者らが先に行った -10°C 付近での実験³⁾ では平衡圧力融解点との温度差を等しくした場合、静水圧が作用するとクリープ速度は減少した。

圧力融点近傍では実験温度が同一の場合には 0.1 MPa~35 MPa の静水圧領域では常に静水圧が増加するとクリープ速度も増し、Jones らの 15 MPa 付近でクリープ速度が最小になるという結果とは異なった。この相違が拡散クリープと転位クリープという変形速度、変形機構の差による静水圧効果なのか、温度領域によるものかは今のところ明かではない。今回の実験では、同一の相当温度で比較すると静水圧が増大する程クリープ速度は減少した。さらに、 $1000/T$ が 3.7 以下の圧力融解点直下ではクリープの活性化エンタルピーも静水圧が増大するにしがって大きくなった。このことは氷河、氷床に於いては深部ほど氷の変形に対する温度変化の影響が大きくなることを示す。

多結晶氷のクリープの活性化エネルギーが -10°C 付近で変わることは先にも述べたが、圧力融解点直下に於ける変形に対しては更に静水圧に敏感な変形機構があることを示唆している。

実験に用い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。実験には工作室ならびに機関室の方々の御協力を得た。あわせて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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Jones, S. H. and Chew, H. A. M. 1983 Creep of ice as a function of hydrostatic pressure.

- J. Phys. Chem.*, **87**, 4064-4066.
- 6) Kirby, S. H., Durham, W. B., Beeman, M. L., Heard, H. C. and Daley, M. A. 1987 Inelastic properties of ice I_h at low temperatures and high pressures. *J. de Physique*, **48**, No. 3 227-232.
 - 7) 東 信彦 1985 氷の塑性に対する静水圧の効果. 雪氷, **17**, 21-26.
 - 8) 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.
 - 9) Meller, M. and Testa, R. 1969 Effect of temperature on the creep of ice. *J. Glaciol.*, **8**, 147-152.
 - 10) Weertman, J. 1983 Creep deformation of ice. *Ann.Rev. Earth Planet. Sci.* **11**, 215-240.