特集 氷の塑性——第7回雪氷物性シンポジウム

氷の塑性に対する静水圧の効果*

東 信彦**

要 旨

最近、ミクロな立場から静水圧下の氷の塑性を調べる実験が行われるようになり、多くの興味ある情報が得られている。特に、低歪速度の転位クリープ領域では、静水圧が高いほど、単結晶中の転位速度は遅くなるのに対して、多結晶氷は変形しやすくなるということが単結晶氷及び多結晶氷を用いた静水圧下一軸圧縮実験から明らかとなった。このことから多結晶氷の定常クリープ速度は転位の基底面上のすべりに支配されているのではなく、自己拡散による転位の上昇運動かその他のプロセスに支配されていると考えられる。本報告では最近の筆者らの研究を中心に紹介し、静水圧下実験の有効性を述べるとともにその問題点についても指摘する。

1. ま え が き

南極氷床深部のように大きな静水圧が加わる場所での氷のダイナミックスを研究するためには、氷の塑性に対する静水圧の効果を明らかにしなければならない。Rigsby (1958) は単結晶氷を用い、静水圧を 35 MPa 近くまでかけてクリープ実験を行い、その結果から剪断歪速度は静水圧に依存しないことを見出した。これは予備的な仕事の結果として重要であるが、データも少なく、実験方法から見ても必ずしも充分とはいえない。その後、氷の静水圧下の塑性を調べる実験はほとんど行われていなかった。

最近、庄子らはファブリックが単極大型の南極氷床深部氷を用いて静水圧 30 MPa 下と常圧下一軸圧縮試験を行った。そして同じ応力に対する氷床氷の歪速度が静水圧下では常圧下より 1 桁も遅くなるという結果を得た (Shoji and Higashi, 1979)。筆者は庄子らの実験と同じ試料、装置を用いて種々の条件で静水圧下一軸圧縮試験を行い、その際の氷の構造変化を詳しく調べた。その結果、庄子らが見出したコアー氷硬化の主な原因は静水圧加圧によって起る再結晶にあることを明らかにした (東, 1983)。すなわち、コアー氷中には気泡が存在するので、静水圧を加えるとそれが収縮し、氷試料全体の塑性変形

を生ずる。そして大きな歪エネルギーが気泡周辺に蓄積され、高温ではこれを駆動力として再結晶が急速に進行するために、試料のファブリックが変形しやすい単極大型から変形しにくいタイプに変化する。これがコアー氷の静水圧下における硬化の原因であると考えられる。従ってファブリックの変化の影響を除いた氷自身の intrinsic な塑性の静水圧依存性を明らかにする必要がある。そのため筆者はファブリックがランダムでかつ気泡を含まない人工多結晶氷とメンデンホール単結晶氷を用いて、種々の静水圧、温度で静水圧下一軸圧縮試験を行った。その結果を要約すると次のようになる。

- 1) 氷河や氷床の流動を議論する範囲内では、塑性の静水圧依存性は殆んど無視できるくらい小さい。
- 2) 静水圧下の氷の塑性を調べる実験は氷の変形機構やミクロ構造についての情報を得るための有力な手段である。

本報告では上記の結論を得るに至った理由を最近の筆者らの研究を中心に紹介し、未解決である多結晶氷の変形機構について微視的な立場から再検討してみたい。

2. 静水圧下の多結晶氷の塑性

氷の変形機構図 (Shoji and Higashi, 1978) によると、多結晶氷の変形機構は (偏差) 応力、温度の範囲によって低応力側から順に次の 4 つに分けられる。

- 1) 拡散クリープ (粒界拡散, 格子拡散)
- 2) 転位クリープ
- 3) クラックの生成を伴う転位クリープ
- 4) 破壊

* Effects of hydrostatic pressure on the plasticity of ice

** 北海道大学工学部応用物理学科 (Nobuhiko Azuma, Department of Applied Physics, Hokkaido University, Sapporo 060)

TC : Thermocouple L : Load Cell
S : Specimen W : Window C : Chuck

図 1 連続加圧タンク内一軸試験機の概念図

したがって変形応力、あるいは降伏応力の静水圧依存性もそれぞれの領域で異なってくるはずである。3)、4)の高応力領域では Jones (1982) が温度 -12°C 、静水圧 $0.1\sim 85\text{ MPa}$ 、歪速度 $10^{-6}\sim 10^{-1}\text{ s}^{-1}$ の範囲で、また Durham ら (1984) は温度 $-20\sim -196^{\circ}\text{C}$ 、静水圧 $0.1\sim 175\text{ MPa}$ 、歪速度 $10^{-6}\sim 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ の広い範囲で人工多結晶氷の定歪速度一軸圧縮テストを行い次の結果を得た。

(1) 上記 3) の領域では、降伏応力は初め静水圧の増加とともに増加していくが、ある静水圧以上では静水圧の増加とともに減少していく。(2) 4) の領域では静水圧が常圧から 50 MPa 付近までは降伏応力は静水圧の増加と共に(1)の場合より顕著に増すが、 50 MPa 以上では静水圧に依存しなくなる。これら Jones や Durham の実験は高歪速度で行われ、クラックが発生する臨界応力の静水圧依存性を明らかにしたという点で重要である。

2) の転位クリープ領域での静水圧依存性を調べる実験は筆者らによって行われた(未発表)。図 1 に示されてい

図 2 多結晶氷を用いた定歪速度一軸圧縮変形における荷重—時間曲線

る連続加圧タンク内一軸試験機(東, 庄子, 1979)を用い、ファブリックがランダムで気泡を含まない人工多結晶氷について応力—歪関係を求めた。温度、静水圧一定のもとで定歪速度で一軸圧縮したときの荷重(応力)の時間的変化の典型的な形は図 2 の右上のようになる。初め 10 MPa で変形し定常的応力に達した後、タンク内の静水圧を 19 MPa に上げると試料は一瞬のうちに弾性圧縮して、変形荷重は図 2 のように急降下する。それが再び上昇して定常状態に戻ったとき、また静水圧を上げるというようにして次々と静水圧を変化させ、各静水圧での定常状態の荷重を測る。これによって変形応力と静水圧の関係を求めた。図 3 は種々の温度におけるこの関係を片対数グラフで示したものである。図は静水圧が高くなるほど変形応力が低くなり、また高温ほどその効果が著しいことを示している。

応力—歪曲線での定常状態は定常クリープに対応するが、一般に定常クリープでの歪速度 $\dot{\epsilon}$ と応力 σ の関係は次の式で表わされる。

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \exp\left(\frac{Q + N_A PV^*}{RT}\right) \quad (1)$$

B : 定数, Q : クリープの活性化エネルギー

P : 静水圧, V^* : クリープの活性化体積

R : ガス定数, T : 絶対温度, N_A : アボガドロ数

式 (1) は中村論文の式 (2) に対応しているが、中村論文では $Q \gg N_A PV^*$ として活性化体積の項が無視されている。両辺の対数をとって整理すると

$$V^* = nRT \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial p} \right)_{T, \dot{\epsilon}} \quad (2)$$

となる。そこで図 3 の直線の傾きから多結晶氷の定常クリープ速度に対する活性化体積が求められるはずである。ここで n の値としては一般に多結晶氷で使われてい

図3 多結晶氷の変形応力（定常的応力）と静水圧の関係

る3という値を用いて各温度での V^* を計算すると、図3中に示してあるように負の値となる。この値は水分子の分子容を Ω とすると $-0.6\Omega \sim -1.6\Omega$ 程度である。

多結晶氷の定常クリープの律速過程として Weertman (1983) は、転位のすべり、格子拡散による転位の上昇の二つを挙げているが、いずれにしても上述の活性化体積の絶対値が温度と共に変化することを説明できない。さらに粒界においては再結晶や粒界すべりがおこることを考えると律速過程は広い温度範囲で一つのものを考えられるほど簡単ではないであろう。粒界の関係する現象の複雑さを取除くために次節の実験が行われた。

3. 静水圧下の単結晶氷の塑性

単結晶氷の変形速度の静水圧依存性については Rigsby 以来詳細な実験はない。Rigsby は単結晶氷をクリープ変形し、その途中で静水圧を変化させ歪速度を比較しているが、可動転位密度がまだ増加している段階で静水圧を変化させて比べているので正確に静水圧依存性を求めることはできない。筆者らは単結晶氷を定歪速度で基底面

図4 単結晶氷を用いた定歪速度一軸圧縮変形における応力—時間曲線と緩和曲線。タイムスケールは矢印の長さで示してある

すべりのおこるように一軸圧縮変形し、図4のように応力降下がおこって時間—応力曲線が定常状態になったとき変形を止め、その際生ずる応力緩和曲線の上で応力と歪速度の関係を求めた。次に圧縮試験機の入っているタンク内の静水圧を上げ（図では 18 MPa）同様の圧縮試験と応力緩和を行い、前と同じ方法でこの圧力の下での応力と歪速度の関係を求める。静水圧をいろいろ変えた場合の結果が図5に示されている（未発表）。応力緩和の方法についての詳細は福田ら (Fukuda and Shoji 1981) の論文を参照されたい。

単結晶の場合には分解剪断歪速度 $\dot{\gamma}$ と有効剪断応力 τ_e の間には次の関係がある。

$$\begin{aligned}\dot{\gamma} &= N_m b v \\ &= N_m b A \tau_e^m \exp\left(-\frac{Q + N_A P V^*}{RT}\right) \\ &= c (\tau_a - \tau_i)^m\end{aligned}\quad (3)$$

$$c = N_m b A \exp\left(-\frac{Q + N_A P V^*}{RT}\right)\quad (4)$$

N_m : 運動転位密度, b : バーガース・ベクトル,

A, m : 定数, τ_a : 変形応力, τ_i : 内部応力

緩和曲線上の各点で得られた歪速度 $\dot{\gamma}$ と変形応力 τ_a の関係が図5に示されているように直線になることは式(3)において m の値が1となることを示している。これは福田ら (Fukuda and Higashi, 1973) による転位速度の応力依存性の実験結果と一致する。直線の傾きは式(4)で与えられるが、この中で N_m は緩和の初期にはほとんど変わらないと考えられるから c の変化は指数項、即ち静水圧 P に依存していることになる。図6は各静水圧での c の値を片対数紙にプロットしたものである。静水圧が増加するにつれて c の値が小さくなる傾向を示してい

形し、る。単結晶の場合は式(3)に示したように変形速度を支配するものは、転位の基底面上のすべりである。したがって上の結果は静水圧が高いほど転位速度が遅くなるということを示している。氷の基底面上の転位速度を律速する機構については様々な説があるが、上に述べた実験結果はそれを考える上で貴重である。また活性化体積 V^* を図6の直線の傾きから計算すると 0.4Ω という値となった。活性化体積の値については筆者らの多結晶氷及び単結晶氷の実験結果を整理して、他の結果とともに表1に示した。

図5 各静水圧下での緩和曲線から求めた基底面上の分解剪断歪速度 $\dot{\gamma}$ と分解剪断応力 τ_a の関係

図6 図5における直線の傾き C と静水圧の関係。縦軸は対数

4. 氷の変形機構

単結晶氷の塑性に対する静水圧の効果が温度に依らないかどうかは今後明らかにする必要があるが、多結晶氷のクリープの活性化体積が負であるのに対して、単結晶氷の活性化体積が正という結果が得られたことは変形機構を考える上で非常に興味深い。

変形速度の律速過程は多結晶の場合、未だ明らかでは

表1 クリープの活性化体積

V^* ($\times 10^{-29} \text{ m}^3$)	圧力範囲	温度	試料	備考
-2.1 } -4.1 } -5.3 }	0.1~60 MPa	-20°C	人工多結晶氷	定歪速度 ($\dot{\epsilon}=1\sim 4 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$)
		-12°C		
		-5°C		
+1.3	0.1~50 MPa	-20°C	単結晶氷	定歪速度 ($\dot{\epsilon}=4.16 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$)
—	0.1~85 MPa	-12°C	人工多結晶氷	Jones (1982) 定歪速度 ($\dot{\epsilon}=10^{-6}\sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)
+5.3	0.1~15 MPa	-9.6°C	人工多結晶氷	Jones ら (1983) クリープ ($\sigma=0.525 \text{ MPa}$)
-9.2	30~60 MPa			
+3.3	0.1~50 MPa	-78°C	人工多結晶氷	Durham ら (1984) 定歪速度 ($\dot{\epsilon}=3.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)
-1.7	50~175 MPa			
-11	0.1~50 MPa	-5°C -9°C	人工多結晶氷 と南極深部氷	粒界移動の活性化体積 (grain growth による)

水分子の分子容 $\Omega=3.3 \times 10^{-29} \text{ m}^3$

ないが、少なくとも単結晶氷の場合のような基底面上の転位のすべりが律速過程ではないことはこの実験から明らかである。

Duval ら (Duval et al. 1983) が主張するように多結晶氷の定常クリープでは、歪速度は転位の上昇運動による substructure の回復過程に律速されているとすると多結晶氷で得られた活性化体積は自己拡散の活性化体積ということになる。氷の自己拡散の活性化体積の値を求めた実験はまだないが、Brown ら (Brown and Ashby, 1980) の計算によると $-2.7 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ ($= -0.8Q$) となり筆者らが得た値はこれにかなり近く自己拡散律速説を支持しているように思われる。

しかし、筆者らの実験結果によれば高温と低温とで静水圧依存性が著しく異なるので、全温度域で単一のメカニズムで説明することはできない。高温ほど静水圧依存性が大いという実験結果に対して次のようなことが考えられる。

1) これまでに、クリープ速度の温度依存性を調べた多くの実験から言われて来たように、多結晶氷の場合、 -10°C 付近を境に低温側と高温側では変形速度を支配するメカニズムが異なる。

2) 高温では粒界近傍で堆積した転位が再結晶によって消失して回復が起り、新しい転位がすべり面上を動くことができるようになって変形が進行する。このプロセスが変形速度を律速するとすれば、高温での活性化体積は再結晶核生成或いは粒界移動の活性化体積となる。筆者らが以前に実験的に求めた粒界移動の活性化体積の値が -5°C でのクリープの活性化体積に近い (Azuma and Higashi, 1983) のはこの考えを支持するように思われる。

3) 融点付近では粒界すべりの影響が大きく効いてくると考えられる。そして粒界での水の存在が粒界すべりを促進する (Mellor and Testa, 1969; Barnes et al., 1971; Duval, 1975, 1983) とすれば静水圧の増加は圧力融解点を降下させるからその効果は著しくなる。

多結晶氷の実験結果からはこれ以上のことは推論できないが、静水圧下実験は氷のミクロ構造や変形機構を考える上での重要な情報を与えてくれることは確かである。

5. 静水圧下実験の問題点

筆者らの実験から明かなように、単結晶氷の場合も多結晶氷の場合も塑性変形の静水圧依存性は小さく、数百気圧の静水圧の範囲では、同一応力に対して歪速度がたかだか 1.1~1.2 倍変化する程度である。したがって氷の塑性に対する静水圧の効果を調べる実験では、歪速

度のわずかな違いを検出する必要があり、実験は非常に難しい。Jones ら (1983) や Durham ら (1984) のように各静水圧に対して異なる氷試料で実験している場合には、静水圧依存性は試料の個性に隠されてしまい、正確な議論をすることはできない。

図3の例では -20°C で2つの試料について実験を行ったが、歪速度はほとんど同じであったにも拘わらず試料の違いによって応力がかかなり異なっており、2つの試料についての値を同一の直線上にのせることはできなかった。このような理由から、静水圧依存性を調べるには同一の試料で実験すべきであるが、多結晶の場合は、同一の試料を用いても次のような問題が残る。それは変形中に集合組織が変化するために同一条件での比較が難しいという点である。さらに静水圧の急激な変化による試料の集合組織変化についても注意を払わなければならない。

6. あとがき

静水圧下の氷の塑性についての研究はまだ少なく、最近の筆者らの研究を中心に述べて来たが、それもまだ十分ではないため問題を提起するだけにとどまった。静水圧下実験は装置の点でも実験方法に於ても難しい実験であるが、これまでに得られた問題点を検討し、一つ一つの現象について系統的に調べてゆくことが今後必要である。終りに、本原稿を校閲していただいた北大工学部東晃教授、図版作製の労を煩わした後藤久美子さんに厚く感謝いたします。

文 献

- 東 信彦, 1983: 南極氷床深部氷の力学的性質と構造変化。北海道大学大学院工学研究科修士論文
- Azuma, N. and Higashi, A., 1983: Effects of hydrostatic pressure on the rate of grain growth in Antarctic polycrystalline ice. *J. Phys. Chem.*, **78**, 4060-4064.
- Barnes, P., Tabor, D. and Walker, J. C. F., 1971: The friction and creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **324**, 127-155.
- Brown, A. M. and Ashby, M. F., 1980: Correlations for diffusion constants. *Acta Metall.*, **28**, 1085-1101.
- Durham, W. B., Heard, H. C. and Kirby, S. H., 1984: Deformation of ice at pressures to 350 MPa at 77 to 195 K. (to be published in JGR).
- Duval, P., 1975: The role of the water content on the creep rate of polycrystalline ice. *Isotopes and*

- Impurities in Snow and Ice*, IAHS Publ. No. 118, 29-33.
- Duval, P., Ashby, M. F. and Anderman, I., 1983: Rate Controlling Processes in the Creep of Polycrystalline Ice. *J. Phys. Chem.*, **87**, 4066-4074.
- Fukuda, A. and Higashi, A., 1973: Dynamical behavior of dislocation in ice crystals. *Cryst. Lattice Defects*, **4**, 203-210.
- Fukuda, A. and Shoji, H., 1981: A dislocation model of the plastic deformation of single crystals of ice. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **4**, 175-185.
- 東 晃・庄子 仁, 1979: 連続加圧タンク内一軸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**, 41-43.
- Jones, S. J., 1982: The confined compressive strength of polycrystalline ice. *J. Glaciol.*, **28**, 171-177.
- Jones, S. J. and Chew, H. A. M., 1983: Creep of ice as a function of hydrostatic pressure. *J. Phys. Chem.*, **87**, 4064-4066.
- Mellor, M. and Testa, R., 1969: Effect of temperature on the creep of ice. *J. Glaciol.*, **8**, 131-145.
- Rigsby, G. P., 1958: Effect of hydrostatic pressure on velocity of shear deformation of single ice crystals. *J. Glaciol.*, **3**, 273-278.
- Shoji, H. and Higashi, A., 1978: A deformation mechanism map of ice. *J. Glaciol.*, **21**, 419-427.
- Shoji, H. and Higashi, A., 1979: Mechanical properties of Antarctic deep-core ice. *J. Glaciol.*, **24**, 487-489.
- Weertman, J., 1983: Creep deformation of ice. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **11**, 215-240.

(1985年1月10日受理)