特集 氷の塑性——第7回雪氷物性シンポジウム

氷の塑性研究の歴史*

中村 勉**

要 旨

1890年のイギリスの McConnel による単結晶の底面すべりの発見の様子がまず述べられた。次にいわゆる Glen の流動則の紹介と、更に活性化エネルギーによる氷内部の変形機構の洞察の歴史、中谷グループによる単結晶氷の変形実験とその変形機構説明のための転位論の導入、そして再び Glen 達による低温度における氷の塑性の存在と、不純物氷の変形挙動とその不純物の軟・硬化作用が述べられた。

はじめに

“氷の塑性”と言うと一般の人々は一瞬“オヤッ”と思うに違いない。いや、もしかしたら、“塑性”という言葉自体それほど人々に膾炙していないであろうから、何の事か分らないといった感をもたれるかも知れない。さらに、そういった人々に対し、例えばこねた粘土を変形させると、その形がもう元に戻らない性質の事を塑性と言い、氷にもそのような性質があるといえ、ますます不思議に思われるに違いない。しかし、この地球上に“氷河”という“もの”が存在することを指摘すれば、少しは納得してくれるかも知れない。

それでは一体、“氷の塑性”は何時頃から人の知る所となったのであろうか。またそれは、どういう事実からであらうか。多分それは氷河の流動からであらうが、そうすると、Tyndal 達と Thomson 兄弟達との長い論争は何だったのであろうか。“転位”の概念を最初に氷に導入したのは誰であらうか、等々と疑問はつきない。

現在、氷の塑性は、氷の中に存在する転位の移動で説明されるようになったが、この稿では、そこに到るまでの歴史を記述してみたい。

1. McConnel による氷の底面すべりの発見

筆者が初めてこの論文に接したのは1969年で、オタワの S. J. Jones 博士の所で化学物質入り単結晶氷の引張変形実験を行っていた時であった。この稿の性格上なら

びに彼が底面すべりの発見に到るまでの経過は読者にも興味深いと思われるので、少し詳述してみたい。

McConnel のこの底面すべりの本論文が発表されたのは彼の死後の1891年3月であるが、この前年の1890年には同じ標題で序報が発表されている。その2年前の1888年には Kidd との共著の“On the Plasticity of Glacier and other Ice”が発表されている。図1は、この論文の実験で用いた装置のうちの精密な引張実験用の装置である。Aが氷試料で、その長さはおよそ10~22cmである。試料の伸び量の測定には、最初の実験では氷の上下端に取りつけた金属針の間をカセットメーターで測定したが、後には精度を上げるため鏡とスケールとを用いた。温度の均一性を保つため、内壁に厚さ4~6cmの木部をだかせたり、かんな屑をすきまに入れたりした。氷試料を2枚の鉄板の間にはさんで宙づりにした引張実験も行った。

図1 種々の氷の引張変形実験に用いた装置。Aが氷試料。長さ約10~22cm (McConnel and Kidd, 1888)

* Historical survey of research works on the plasticity of ice from 1888 to 1978

** 国立防災科学技術センター新庄支所 (Tutomu NAKAMURA, Shinjo Branch, National Research Center for Disaster Prevention, Shinjo, Yamagata 996)

実験に用いた氷試料の種類は、容器(bath)中で凍らせた氷(実験後の検査で単結晶であることが分った.)、型の中で凍らせた氷(型氷)、氷河水、つららそして湖水の5種類でこれらについては引張実験(定荷重)を、圧縮実験は氷河水と湖水について行った。力は、おおよそ $1.5 \sim 5 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で、温度範囲は平均値にして $0 \sim -10^\circ\text{C}$ であった。そこで得られた歪速度は一つの試料を除いて $7.8 \times 10^{-10} \sim 1.6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ の範囲内にあり、氷試料は多結晶であった。上に“一つの試料を除いて”と書いたが、この試料はたまたま単結晶であった(McConnel, 1888)。

これらの実験結果から彼らは、当時世に言われていた“氷河水は圧縮についてのみ塑性があるが、張力下ではそれは無く、又、復氷がこの変形過程の本質である”ということは間違いであると主張した。すなわち、多結晶氷からなるどんな氷も、圧縮力あるいは張力のもとでは塑性を示すこと。しかし、単結晶氷にあっては、その光

図2 中央部分が単結晶で、重りをつける前はその光軸はほぼ鉛直であった氷の加重後の形。幅10mm、厚さ9mm。重りは1.29kg。時間は11:20~20:30(1890年12月14日)、最高温度: -2.8°C 、最低温度: -5.6°C 、平均: -3.6°C (McConnel, 1891)

図3 湖水の変形後、変形前は単結晶と思っていたが、実際には光軸がわずかに違っていた。光軸は長さ方向に平行。矢印は光軸方向(McConnel, 1891)

図4 図3の点線より上部の氷中で起きたに違いない剪断の模式図(McConnel, 1891)

軸方向に垂直に力が加えられた場合、その力が圧縮力であろうと張力であろうと、その力によってその形を変えないであろうという事を実験的事実として認識せざるを得なかった*。それで、どうも単結晶氷にあっては塑性はない様であるから、その脆性の確証のために実験を行ったところ、塑性を見出したものである(McConnel, 1890 と 1891)。

その実験は次の通りであった。すなわち、今までの伸長あるいは圧縮実験ではなく、いわゆる曲げ試験を行ったのである。この曲げ試験について説明する前に当時の塑性のメカニズムの考えの一端を述べると、それはJames Thomson (William Thomson すなわち後の Lord Kelvin の兄)の復氷説であり、応力の高い粒界で融解した水が、応力の小さい所まで流れ、そこで又凍結するという考えであった。この復氷説が低温度下でも成り立つためには不純物の介在とその拡散による機構を考えねばならないが、これには時間がかかりすぎて説明できない。又、単結晶内部での変形が無いとすれば、粒界での動きしか考えられない等であり、これらの疑問を解消すべく、単結晶6個から成る棒状氷の両端を支持し、中央部に重りをかけたのである。2日後、それはかなり曲ったが、偏光器の下では粒界には何も変化を見出せなかった。しかしながら一つの結晶は完全にその様相を変えていた。焼きなましをしていないガラスを想い出させたという。不規則な環で囲まれた二つの色ついた中心像があった。これはまぎれもなく、この結晶は弾性変形以外の何かをこうむったものであるに違いない。

この後の実験で次の事を確かめた。すなわち、棒状氷に重りをつける場合、光軸が棒の長さ方向に直角でかつ水平である時には塑性変形は起きないが、この棒を90度回してc軸を鉛直方向にして重りをかけると短時間で棒の中央部に永久的な降下がみられた(図2は、彼の第3番目の実験で見られたV字型変形の様子を示すスケッチ)。この説明として彼は、氷の結晶はあたかも、とても薄い板が無数の数だけ重なり合ったものから出来ていて、その間には何か粘性的物質があり、この物質でその薄板がつながっている。そしてこの物質がかなりの抵抗をもちながらもその薄板のスライドに寄与している。そしてこの薄板は伸びの性質は完全に持たないが、曲げの性質は持つとした。

図3はc軸が試料の長さ方向に平行だった時に起きた変形。図4は底面すべりの模式図(共に McConnel, 1891)。

* 柱状単結晶氷の試料長方向に直角方向にc軸がある氷の引張実験および他の実験結果による。

今現在の我々の常識からすれば、単結晶氷の底面すべりという事実はごく当たり前であるが、約100年前のこの発見は本当に exciting な出来事であつたろうと思われる。しかしこの発見も、当時の氷河の流動に関する二大論争（例えば若浜, 1978）の中では何人かの雪氷学者の関心をひいたようではあるが、40年後の W. H. Bragg と W. H. Barnes の氷のX線解析による氷分子の配列の発見まで、この事の重要性はあまり顧みられなかった(M. F. Perutz, 1948)。こうして、McConnel の実験を振り返ってみると、現在知られている底面滑り現象が約100年前に既に見出されていたという事実に驚くのは、筆者だけであらうか？

2. Glen の法則と変形の温度依存性

氷の力学的性質を調べたことのある人にとっては、ジョン・グレンの名はなじみ深いに相違ない。現在、グレンの法則といわれる様になった氷の流動則に関する最初のレポートは1952年のものである。この実験は冷凍機のパイプについた霜に水を加えて作った人造多結晶氷についての定荷重圧縮クリープ実験の結果である。その結果は図5、図6、図7に示した通りである。図5に見られる通り、荷重が加えられると瞬間的にある程度変形するが、その後はよりゆっくりと変形し、約60時間後からその変形のし方は一様になり、それまでは曲線を描いていたものが、ほぼ一直線になる。すなわち、“定常クリープ”（正しくは最小クリープ速度下のクリープ）である。この様な定常クリープに対して、その歪速度とそれに要した応力との関係を示したのが、それぞれ図6、図7であ

図5 1本の多結晶氷試料（長さ 10.2 cm, 直径 4.63 cm）について得られた典型的なクリープ曲線。荷重 48 kg。氷試料には、おら下げた重りにより圧縮荷重が加えられるようになっている。実験温度は $-0.8 \sim -2.5^{\circ}\text{C}$ 、平均 -1.5°C (Glen, 1952)

図6 多結晶氷の定常クリープ歪速度の応力依存性 (Glen, 1952)

図7 図6の対数表現。9.4 bar と 10.5 bar との値は図6にはプロットされていない。この場合、クリープの式は、 $\dot{\epsilon} = 0.0074\sigma^4$ と表現された (Glen, 1952)

る。グレンはアンドレードが金属の方で用いていたクリープの式をこの氷にも当てはめた。すなわち、

$$\dot{\epsilon} = k\sigma^n \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ は歪速度、 σ は応力、 k 、 n は常数である。図7から $n=4$ と求められ、 $\dot{\epsilon}$ に years^{-1} 、 σ に bars を用いると k は 0.0074 である。この論文で、単結晶氷の底面滑りも述べてはいるが、定量的なものではない。これについては1954年に発表している(Glen and Perutz, 1954)。すなわち、円い容器中で成長させた単結晶を用い、その c 軸方向と引張方向とのなす角度を変えた定荷重クリープ実験を -6°C で行った。そして、すべりは専ら底面でのみ起きること、そしてそのすべりは融点近くでは特定方向には無いことを述べた。この底面すべりの無方向性についてはSteinemann (1954) が人造単結晶氷の剪断実験でも確かめた(図8)。又、同時に単結晶氷について $\dot{\gamma} = k\tau^n$ が成立することを示した(図9, 図10)。指数 n はクリープ段階で異なり、処女氷にあってはその変形歪の 10~20% の所で 2.3~4 (平均 3.2)、変位点を過ぎた所では 1.3~1.8 (平均 1.6) という値であった。この変位点というのは、処女氷が 10~20% を過ぎると軟かくなるが、その点に相当する。なお、この Steinemann の論文は1953年12月に、Glen と Perutz のそれは1954年1月に受理されているが、Glen 達の論文が前頁に印刷されているのは興味ある。

Glen は引続き人造多結晶氷の室内クリープ実験(圧縮)を、応力範囲 1~10 bars, 温度範囲 $0^\circ\text{C} \sim -13^\circ\text{C}$ に広げて行い、1954年の11月にこれを発表した(Glen, 1954)。この実験でも、定常クリープ変形時においては、前と同じく、 $\dot{\epsilon} = k\sigma^n$ の式が成り立つことを示した。又、種々の温度下での実験結果は図11の様に示され、明らかに温度依存性のあることが認められる。それゆえ、上式に温度の変数が入った式が提出された。すなわち、

図8 Steinemann による単結晶氷の底面すべりの無方向性。剪断実験、 -2.3°C (Steinemann, 1954)

図9 単結晶氷の剪断実験で得られた歪・時間曲線。温度 -2.3°C (Steinemann, 1954)

図10 同じ Steinemann の実験で得られた歪速度・応力の関係 (Steinemann, 1954)

$$\dot{\epsilon} = B \exp(-Q/RT) \sigma^n \quad (2)$$

ただし、 $\dot{\epsilon}$: 最小クリープ歪速度、 σ : 作用した応力、 R : ガス常数、 Q : 活性化エネルギー、 T : 絶対温度、 B, n は常数、 n は約 3.2、 Q は 7.6 kJ/mol (32 kcal/mol)、 $\dot{\epsilon}$ を years^{-1} 、 σ を bars で表わすと、 $B=3.5 (7 \times 10^{24})$ である。

3. 中谷等の研究

中谷はメンデンホール氷河から運ばれた単結晶氷を用いて曲げ試験を 1952 年～54 年に米国で行った (六車, 1971)。すなわち、単結晶塊から切り出した長さ約 7 cm、幅 1.3 cm、厚さ 0.3～1.1 cm の単結晶の c 軸を種々の方向に向けて三点荷重方式でその変形を観察した。図 12 にはその変形量の測定法を、図 13 は荷重前後の様子を、図 14 は実験のまとめを示す。中谷が求めた結論四つ (Nakaya, 1958) のうち少なくとも三つは McConnell が述べている結論と同じであるが、中谷は 300 例にも及ぶ多数の実験結果から、氷の底面すべりについての諸性質を結論づけたのである。

中谷の報告書をみると、単結晶氷の底面すべりの様子

図 11 種々の温度での最小クリープ速度の応力依存性 (Glen, 1955)

図 12 中谷の用いた曲げ試験法。W: 荷重, M_1, M_2 : 鏡, T: 望遠鏡, S: 目盛り (Nakaya, 1958)

や、支点の所での屈曲点における小角度粒界などが写真を通してはっきりと見える。McConnell も感じた氷の金属に似た性質は、中谷の“氷は金属である”という言葉に代表されよう。そして、この中谷の単結晶氷の力学的性質の研究は、我国における氷の、特に単結晶氷の力学的性質は勿論のこと、氷中の構造欠陥あるいは、単結晶氷の物性論の研究へ大きな影響を与えたのである (例えば東, 1965)。

図 13 単結晶氷の曲げモード。a) 変形前。c は氷の主軸を、矢印はその方向を意味する。横線は氷の底面を意味する。b) 単結晶氷では起きなかった曲面変形。c) 実際に起きた V-型変形 (Nakaya, 1958)

図 14 単結晶氷の変形に見られたパターン。向って左側が変形前、右側が変形後。左側の矢印は c 軸方向を示す (Nakaya, 1958)

他方、中谷とは独立につららや人造単結晶氷の引張実験や曲げ試験をしていた若浜の仕事がある(若浜, 1957, 1958a, 1958b). 図15は、同氏の引張実験から求められた最小クリープ歪速度の応力依存性を示すもので、同図には前述の McConnell-Kidd や Glen の値も比較として載せてあるが、良い一致がみられる。

1962年の吉田・若浜の仕事は、水中における考えられる種々の転位模型を考察した初めての論文である。これは日本語で書かれていたので、残念ながら外国人に知られるのにいささか時間がかかったようであるが、最近の

図15 多結晶氷(つらら)の最小クリープ歪速度の応力依存性 (若浜, 1957)

図16 歪速度(変形速度)を変えた場合に見られた応力・歪曲線。-15°C. 単結晶(Higashi et al., 1964)

氷の転位について書かれた論文には引用されるようになった。私事で恐縮だが、筆者が北大の低温研に奉職していた時、丁度低温研創立25周年記念の国際学会が開かれたが、その時、御二方の作られた氷の転位模型の陳列の時、その転位をどう読みとるのか分らず、その展示には結局若浜教授の手をわずらわせてしまったものである。これらの仕事は、塑性変形の転位論的解釈等の仕事(若浜, 1962a, -b, -c, -d)へと続いた。この様に当時は、氷の塑性の転位による説明へと向っていたので、転位の水中における確認と発見が待たれていた。

1964年に東達は、メンデンホール氷河から採取してきた単結晶氷を用いて行った引張実験の結果を発表した(Higashi et al., 1964). 図16, 図17はその結果の一部であるが、図16は -15°C での種々の歪速度を変えた場合の応力・歪曲線、図17の方は一定歪速度下での種々の温度を変えた場合の応力・歪曲線を示す。この二つの図は見事に氷の変形の温度、あるいは歪速度依存性を示したもので、現在では氷の物理のあちこちの教科書に引用されている。筆者がこの結果に接したのは北大大学院時代であるが、この様なことがまだ知られていなかったのかと思ひ驚いたものであった。しかし、中谷先生が亡くなられた後、先生の残された氷のデータの整理をされていた東先生が、中谷先生のデータに温度依存性を見出そうとしたが仲々それができず、新たに御自身で実験を

図17 温度を変えた場合の応力・歪曲線。単結晶(歪速度: $8 \times 10^{-6} \text{ min}^{-1}$, Higashi et al., 1964)

なされたという風に洩れ伺っている。図16, 17は実験結果のごく一部であり、実験温度範囲は $-15^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ 、歪速度範囲は $8 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ であり、これらの結果から、最大応力 $\tau_{\max}$ を歪速度 $\dot{\epsilon}$ ならびに絶対温度 T を含んだ式として次の様に表現した。

$$\tau_{\max} \propto \dot{\epsilon}^{1/m} \exp(E/RT) \quad (3)$$

ここで m は常数、 E は活性化エネルギー、 R はガス常数である。この式は1955年に Glen が導出した式と物理的意味合いは同じである。違う点は、Glen は最小歪速度クリープ現象をこの式で表現したが、東達(1965)は最大応力(降伏応力)時現象をこれで表現した。東達は引続き単結晶氷の曲げクリープ試験の結果を発表した (Higashi et al., 1965)。図18はこの実験に用いた装置の模式図(原理図)を示す。図19はそのクリープの一例を、図20は全実験をまとめたものである。これらの結果は又、上の式と同じ形で表現された。

活性化エネルギーは、あるものの変化機構にあずかるエネルギーを表わすものであるが、Glen が1955年に多結晶氷の最小歪速度クリープ変形機構から求めた値は、 7.6 kJ/mol であったのに対し、東達の求めた単結晶氷の降伏応力を目安として求めたものは 2.48 kJ/mol 、単結晶氷の曲げ試験の方から求めた値は 3.77 kJ/mol であった。

1961年、六車 (Muguruma, 1960) はスクリーディスロケーションに対応するのではないと思われる食像を電子顕微鏡で発見し、1963年には、非底面すべりに起因すると思われる食像の電子顕微鏡写真を撮影した。すなわち、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 又は $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向にみられた食像は転位の動いた跡であると考えられた (Muguruma and Higashi, 1963a, 1963b)。1966年にはこの非底面すべりにおける応力・歪曲線(図21)と同時にその非底面すべりが起きる場合に発生した空洞が報告された (Muguruma et al., 1966)。図16の底面すべりの時の応力・歪曲線と比べると分るように、非底面すべりが発生するために必要な応力は、底面すべりの場合の10倍ほど大きいという事が知られよう。

図18 東達が用いた曲げクリープ実験の模式図。ローラ付きの支点は横方向に自由に動ける (Higashi et al., 1965)

図19 単結晶氷を用いて求めた典型的なクリープ曲線と潜伏時間 t_i 。 ϵ_s は定常状態になった時の歪、 t_s はそれまでの時間 (Higashi et al., 1965)

図20 歪速度及び潜伏時間の逆数の応力依存性 (Higashi et al., 1965)

4. 再び Glen 達の実験

今までの話は、もうすでに気付かれた読者もおられようが、変形時の温度が比較的高い場合であった。ところが、北大の低温科学研究所創立25周年記念の国際雪氷学会が札幌で開かれた際に、Glen が低温での氷の塑性を講演した(Glen and Jones, 1967)。余談になるが、筆者は当時氷の塑性についてはそれ程関心があった訳ではないが、それでも -50°C での氷の変形という事実には驚いたものである。会議終了後の洞爺湖へのツアーに向うバスの中で、Glen 先生から親しく低温での変形の話をついたものであるが、後日 Glen 先生の御弟子の Stephen Jones 博士と一緒に氷の塑性の仕事をするとは当時思ってもみなかった。

図22は彼らによる人造単結晶氷の引張りクリープテストの -50°C で得られた曲線である(Glen and Jones, 1967)。更に低温の -60°C での種々の荷重の値における歪・時間曲線を基に得た歪速度・応力の関係を図23に示す(Jones and Glen, 1967)。図24は、種々の氷に対

図21 単結晶氷の非底面すべり変形時の応力・歪曲線 (Muguruma et al., 1965)

図22 人造単結晶氷の -50°C で得られた引張りクリープ曲線 (Glen and Jones, 1967)

する歪速度と温度との関係を示すもので、これから活性化エネルギーが求められた。すなわち、 $-10^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ の間では $3.73 \pm 0.19 \text{ kJ/mol}$ ($0.68 \pm 0.04 \text{ eV}$) の、 $-50^{\circ}\text{C} \sim -90^{\circ}\text{C}$ では $2.27 \pm 0.14 \text{ kJ/mol}$ ($0.41 \pm 0.03 \text{ eV}$) の値である。以上はクリープ実験の話であるが、図25は人造単結晶氷の種々の温度下での定歪速度圧縮実験における応力・歪曲線であり、図26は降伏応力の温度依存性を示す。応力・歪は氷の底面上の値である。

この低温度における実験において、弗化水素 (HF) 混入単結晶氷の性質が調べられ、弗化水素が氷の変形を容易にすることが見出された (Jones, 1967)。図27と図28はそれぞれ、クリープ実験と定歪速度圧縮実験で得られた純氷と HF-氷との曲線を示す (Jones and Glen, 1967)。HF の軟化作用の程度は例えば HF-単結晶氷を作った後、両手の指で HF-氷をつまみ、氷の底面と親指の爪の

図23 人造単結晶氷の -60°C で得られた引張りクリープ曲線の対数表現 (Jones and Glen, 1967)

図24 人造単結晶氷の引張りクリープ実験から求められた歪速度の温度依存性 (Jones and Glen, 1967)

図 25 人造単結晶氷の圧縮定歪速度 ($1.6 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1}$) 実験から求められた種々の温度での応力・歪曲線 (Jones and Glen, 1967)

面とが同じ向きをもった面内にくるようにしてゆっくりと曲げると、その HF-氷は容易に曲がることからはっきりと体感できる。Jones 博士が、初めて HF の軟化作用を見出した時、それは HF-氷を前日夕べにセットした翌朝のことだったそうであるが、朝来て氷をみると伸びきっていて非常に驚き、早速 Glen 博士に知らせた所、同博士は小躍りして喜んだという。この直後に Glen は一つの論文を発表した。すなわち、転位の移動のためには Bjerrum 欠陥やイオン欠陥が生ずることになるが、これらの欠陥が作られるためには莫大なエネルギーが必要とされる。それゆえ、実際に転位の移動が起る前に水素原子の再配列があつてのみ可能である。HF は氷の格子中で L 欠陥を作りつつ、この再配列を容易にする作用があるとするものである (Glen, 1968)。Jones と Glen は引続き NH_3 や NH_4F 混入単結晶氷の力学的性質を調べ、 NH_3 にあっては硬化作用のあることを、 NH_4F については特段の作用のないことを実験的に報告した (Jones and Glen, 1969)。Nakamura and Jones (1973a, -b) の仕事は、この線上の仕事の一環であり、HCl も HF ほど顕著ではないが軟化作用のあること、更に、HF の比較的高温度においてもその軟化作用のあることが示された (Nakamura, 1978; 中村, 1978)。

Glen が転位の移動と点欠陥の相互作用についての論文 (前出, 1968) を発表した後、氷に弗化水素が入ると転位密度が増えるという事実が発表され (Jones and Gilra, 1972)、その軟化作用は転位の導入により容易になるとした (Jones and Gilra, 1973)。又、前年の 1971 年には NH_3 入り氷中に同心円の転位環が見出されている (Oguro and Higashi, 1971)。この様に、従来のマクロな氷の塑性の研究に加えて、転位論的な考察を容易にするような実に数多くの氷の内部構造の直接的観察についての論文が続

図 26 人造単結晶氷の定歪速度実験から求められた最大応力の温度依存性 (Jones and Glen, 1967)

図 27 人造単結晶氷の -70°C で得られた引張りクリープ曲線の純氷と HF-氷との比較 (Jones and Glen, 1967)

図 28 人造単結晶氷の -70°C における圧縮定歪速度実験で得られた応力・歪曲線。純氷と HF-氷との比較。 $\dot{\epsilon}_n = 2.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (Jones and Glen, 1967)

々と発表されてきている。氷の塑性については、今後も、活性化エネルギーなどの様な物理量の測定とその解釈と同時に、それらと氷の微細構造の考察、すなわち、転位や点欠陥の考察やそれらの間の関係についての研究がなされるであろう。転位論に立った氷の塑性について論ずること（六車，1971）は筆者の任ではないし、特に最近のものについては、この拙稿の後の福田明治博士によってなされるであろうと思われるので、この辺でこの稿を終ることにしたい。

なお、多結晶氷の力学的性質についてのレビューペーパーが最近出ているので、参考までに記述する（Hooke 他，1980；Goodman 他，1981）。

あとがき

筆者が当時（1969年）考えてもいなかった氷の塑性の実験をカナダですることになり、それが機会でこの稿をまとめることになった。日本へ帰ってきて行った氷の実験のレポートを書き上げてからすでに今日まで6年の月日が過ぎた。この間、氷の内部構造に関する論文は上にも記した通り、数えきれないほどである。しばらく氷の塑性から離れた仕事をしていた筆者から改めて氷の塑性の研究の歴史をふり返ってみると、それはMcConnelの底面すべりの発見までの時代、その後の再発見、氷の流動則の発見とその確立、活性化エネルギーを手がかりにした氷の変形機構の説明、氷の点欠陥や転位論の氷の塑性変形機構への導入などいくつかのエポックが感じられるが、改めて中谷先生の偉大さが感じられるのである。現在の筆者の立場からすると、これらの氷の塑性論あるいは氷の物性論が将来、雪氷防災分野にどの様に役立つかは具体的には列記はできないが、必ず役立つものと信じるし、又すぐには気が付かないが、いろいろな点で既に役立っているに違いない。雪氷による被害の原因やその機構を考える時、氷の塑性という概念が頭の中にあるはずである。科学とはこの様に目にはつかない所で少しずつ役立つものの様である。

この稿をまとめるに際し、いくつかの貴重な参考文献を送って下された六車二郎、若浜五郎両教授に深謝する。又、古い論文のコピーやトレースをそれぞれして下された水野暎子嬢、杏沢滋子嬢ならびにこの稿を書く機会を与えて下さった本堂武夫博士に深謝するものである。

文 献

Glen, J. W., 1952: Experiments on the deformation of ice. *J. Glaciol.*, **2**, 111-114.
Glen, J. W. and Perutz, M. F., 1954: The growth and deformation of ice crystals. *J. Glaciol.*, **2**,

397-403.

- Glen, J. W., 1955: The creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. London, A*, **228**, 519-538.
Glen, J. W. and Jones, S. J., 1967: The deformation of ice single crystals at low temperatures. *Physics of Snow and Ice*, **1**, 267-275.
Glen, J. W., 1968: The effect of hydrogen disorder on dislocation movement and plastic deformation of ice. *Phys. kondens. Mater.*, **7**, 43-51.
Goodman, D. J., Frost, H. J. and Ashby, M. F., 1981: The plasticity of polycrystalline ice. *Philos. Mag. A*, **43**, 665-695.
Higashi, A., Koinuma, S. and Mae, S., 1964: Plastic yielding in ice single crystals. *Jap. J. Appl. Phys.*, **3**, 610-616.
Higashi, A., Koinuma, S. and Mae, S., 1965: Bending creep of ice single crystals. *Jap. J. Appl. Phys.*, **4**, 575-582.
東 晃, 1965: 氷の単結晶の塑性. *応用物理*, **34**, 2, 80-90.
Hooke, R. LeB. and Mellor, M. (co-chairmen), 1980: Mechanical properties of polycrystalline ice: an assessment of current knowledge and priorities for research. *Cold Reg. Sci. Technol.*, **3**, 263-275.
Jones, S. J., 1967: Softening of ice crystals by dissolved fluoride ions. *Phys. Lett.*, **25A**, 366-367.
Jones, S. J. and Glen, J. W., 1967: The mechanical properties of single crystals of ice at low temperatures. *Comm. Snow and Ice, Gen. Assem. Bern*, 326-340.
Jones, S. J. and Glen, J. W., 1969: The effect of dissolved impurities on the mechanical properties of ice crystals. *Phil. Mag.*, **19**, 13-24.
Jones, S. J. and Gilra, N. K., 1972: Increase of dislocation density in ice by dissolved hydrogen fluoride. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 319-320.
Jones, S. J. and Gilra, N. K., 1973: X-ray topographical study of dislocations in pure and HF-doped ice. *Philos. Mag.*, **27**, 457-472.
McConnel, J. C. and Kidd, D. A., 1888: On the plasticity of glacier and other ice. *Proc. Roy. Soc. London*, **44**, 331-367.
McConnel, J. C., 1890: On the plasticity of an ice crystal. *Proc. Roy. Soc. London*, **48**, 259-260.
McConnel, J. C., 1891: On the plasticity of an ice

- crystal. Proc. Roy. Soc. London, **49**, 323-343.
- Muguruma, J., 1960: Spiral etch-pits of ice crystals. Nature, **190**, 37-38.
- Muguruma, J. and Higashi, A., 1963a: Non-basal glide bands in ice crystals. Nature, **198**, 573.
- Muguruma, J. and Higashi, A., 1963b: Observation of etch channels on the (0001) plane of ice crystal produced by nonbasal glide. J. Phys. Soc. Jap., **18**, 1261-1269.
- Muguruma, J., Mae, S. and Higashi, A., 1966: Void formation by non-basal glide in ice single crystals. Philos. Mag., **13**, 625-629.
- 六車二郎, 1971: 氷の塑性. 日本金属学会会報, **10**, 653-666.
- Nakamura, T. and Jones, S. J., 1973a: Mechanical properties of impure ice crystals. Physics and Chemistry of Ice, Roy. Soc. Can., 365-369.
- Nakamura, T. and Jones, S. J., 1973b: The effect of impurities on the mechanical properties of ice single crystals. Dep. Envir., Inland Water Dir., Sci. Rep. Ser. **24**, 365-369.
- Nakamura, T., 1978: Mechanical properties of impure ice single crystals at high temperatures. Proc. Symp. Ice Problem., IAHR, Part 1, 273-291.
- 中村 勉, 1978: 不純物含有氷の高温における力学的特性. 国立防災科学技術センター研究報告, **20**, 293-324.
- Nakaya, U., 1958: Mechanical Properties of Single Crystals of Ice. SIPRE Res. Rep. **28**, 46 pp.
- Oguro, M. and Higashi, A., 1971: Concentric dislocation loops with [0001] Burgers vectors in ice single crystals doped with NH_3 . Philos. Mag., **24**, 713-718.
- Perutz, M. F., 1948: Glaciers. Science News VI, Penguin Books, 105-127.
- Steinemann, S., 1954: Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals. J. Glaciol., **2**, 404-412.
- 若浜五郎, 1957: 氷の流動学的性質について I. 低温科学, **A16**, 227-240.
- 若浜五郎, 1958a: 氷の曲げ試験. 低温科学, **A17**, 87-97.
- 若浜五郎, 1958b: 彎曲させた単結晶氷に見られた二, 三の現象. 金属物理, **4**, 257-258.
- 若浜五郎, 1962a: 氷の塑性変形について I. 低温科学, **A20**, 57-75.
- 若浜五郎, 1962b: 氷の塑性変形について II. 低温科学, **A20**, 77-100.
- 若浜五郎, 1962c: 氷の塑性変形について III. 低温科学, **A20**, 101-116.
- 若浜五郎, 1962d: 氷の塑性変形について IV. 低温科学, **A20**, 117-130.
- 若浜五郎, 1978: 氷河の科学. 日本放送出版協会, 236 pp.
- 吉田順五・若浜五郎, 1962: 氷の結晶の転位模型. 低温科学, **A20**, 29-56.

(1985年1月10日受理)