



Title	氷の内部破壊について
Author(s)	若浜, 五郎; WAKAHAMA, Gorow
Citation	低温科学. 物理篇, 23, 39-50
Issue Date	1965-03-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18019">https://hdl.handle.net/2115/18019</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	23_p39-50.pdf



## 氷の内部破壊について\*

若 浜 五 郎

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 39 年 12 月受理)

### I. ま え が き

衝撃のような外力が急激に氷に加えられたとき、あるいは、大きな歪速度で氷を変形させたばあいには、氷は容易に破壊し、脆性を強くあらわす。逆に、小さな歪速度でゆっくり変形させたばあいには、氷は強い塑性あるいは流動性を示し、大きな歪量に達してもなお塑性変形をつづける。氷のこのような性質については、古くは McConnel<sup>1)</sup>, Mügge<sup>2)</sup>, 松山<sup>3)</sup>, 最近では中谷<sup>3)</sup>, Glen<sup>4)</sup>らの研究がある。これらの研究は、氷の円柱、角棒などについて行なわれた巨視的なものであった。従って、今までの研究のうち、氷の顕微鏡的な微細な変形の過程や変形機構にふれたものは数少ないといえる。筆者は数年来、薄板状に切った氷を圧縮または伸張し、変形にともなっておこる細かい変化を偏光顕微鏡の下で直接観察してきた。得られた結果の一部は、すでに文献 5, 6 に報告した。ただ、これまでの報告では、主として氷の塑性変形に際してみられる氷の組織の変化についてのべてきた。本報告では、氷の破壊現象およびそれに附随しておこる諸変化を偏光顕微鏡の下で直接観察してえた結果についてのべる。実験に用いた装置、氷の試料などは、氷の塑性変形に関する報告 V (文献 6 の第 II 節) でのべたのと全く同一である。氷の薄板の圧縮または伸張は、歪速度が 10%/hr のていどでおこなった。実験はすべて、 $-5^{\circ}\text{C}$  の温度に調整された恒温槽の内部でおこなった。

### II. 氷の内部破壊の型

多結晶の氷の薄板を、その面にそって一定の歪速度で圧縮すると、変形がすすむにつれて氷体のあちこちで内部破壊がおこる。はじめは小さな局所的な割れ目だったものが次第に大きく発達して、ついには薄板全体にわたる大きな破壊に至る。薄板を伸張したばあいにも、もちろん、圧縮のばあいと同様破壊がみられる。しかし、伸張実験は圧縮実験にくらべて回数が少なかったので、この報告では主として圧縮の際にみられる破壊をとりあげることにする。

圧縮のばあいにみられる内部破壊を調べると、いろいろな型のあることがわかる。つぎにそれを列挙してみよう。

(i) **粒内破壊**: 結晶粒内部の一点あるいは結晶粒界のある点で破壊がはじまり、結晶粒内

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 696 号

で破壊が拡大，進行するもの。破壊はその結晶粒だけに限定されるか，あるいは，破壊がかなり発達したのち，他の結晶粒に波及するかである。この粒内破壊はさらにつぎの三種類に分けられる。

**a 三角形破壊核による破壊：** 結晶粒内に形成された屈折面上に鈍角三角形の小さな破壊核が発生し，結晶底面にそって破壊が拡大するもの(図版 I-1, 図版 II-5, 6, 7)。

**b 粒内横断破壊：** ひとつの結晶粒をよぎり，端まで瞬間的に直線状に割れ目が生ずる型(図版 I-2)。破壊は三叉粒界から発生することが多く，特定な面にそって進むとは限らない。

**c 間歇的に進行する破壊：** 結晶粒内を割れ目が急激に進行しては一旦停止し，破壊の伝播が不連続的に起こる型(図版 III)。破壊が進行する際，しばしば進行方向が変わる。結晶底面とそれに直角な柱面にそって進むことが多いが，結晶錐面にそって伝播するばあいもしばしばみられる(図版 III-12)。

(ii) **粒界破壊：** 破壊が結晶粒界でおこり，粒界にそって進行，伝播するもの。このうち主なものは粒界剝離である。

**a 粒界剝離：** となりあう2個の結晶粒の間の境界が剝離しておこる内部破壊である。結晶粒界が直線状(実際には平面状)のばあいには，この内部破壊によって，一般に，細長い三角形の空隙が発生する。これについては，氷の塑性変形に関する報告 V ですでにくわしくのべたので，本報告ではあまりふれないことにする(文献 6 の第 5 図参照)。三個の結晶粒が一点に会してつくる三叉粒界でも粒界剝離がおこり，V 字型の空隙を生ずる(図版 I-3)。

**b その他の粒界破壊：** 粒界にある角度をなして小さな破壊がおこり，以後ほとんど発達しない型のもの(図版 I-1 の S と印した破壊)。

(iii) **粒間破壊：** 氷体内におこった破壊が，いくつかの結晶粒をよぎって急速に伝播，進行するもの。この型の破壊は，この報告でのべるようなゆっくりした圧縮(歪速度 10%/hr)ではあまりみられなかった。しかし，急速な圧縮や伸張のばあいには屢々観察される。

多結晶の氷でなく，単結晶の氷なら，単純圧縮または単純伸張ではなかなか破壊しない。底面迂りによって強度の塑性変形をおこすだけである。しかし，底面迂りがおこらないようにすると，単結晶の氷といえども容易に破壊する。たとえば，結晶主軸の方向あるいはそれに直角な底面の方向に伸張すると，底面または柱面で劈開破断がおこる(図版 II-8)。これらの方向の圧縮では，底面または柱面にそう間歇的進行型の破壊がみられる。割れ目が大きく発達してからは，結晶錐面にそって破壊が進むこともある(図版 III-12)。

単結晶の破壊はこのように比較的簡単だが，多結晶氷では，上の (i) から (iii) にいたるすべての型の破壊がみられる。しかし，これらの破壊にはつねに，底面迂り，底面の弯曲，屈折面の形成，粒界迂りなどの塑性的な変形が伴う。それゆえ，破壊現象だけを独立にとりあげて説明するのは困難でもあり，意味もない。次節以下で，これらの型の破壊現象のうちのいくつかを，塑性的な変形とからみあわせつつ，順次のべて行くことにする。

### III. 三角形破壊核による破壊

#### 1. 三角形破壊核の発生とその後の発達、拡大

多結晶の氷を曲げたり圧縮したりして変形させると、結晶粒のいくつかに底面沁りがおこる。そして底面は弯曲し、屈折面が形成されるにいたる(文献6の第IV節参照)。さらに変形がすすむと、しばしば、いくつかの屈折面上のある部分で底面の一部が剝離し、小さな鈍角三角形の空隙が発生する。図版II-5の中央部O, P, Qと印した点を結ぶ空隙がその例である。この写真は、圧縮変形中の薄板状多結晶氷の、ある結晶粒の一部をとったもので、圧縮は写真の左右の方向におこなわれた。結晶主軸(c軸)はほぼ薄板の面内にあり、図5に矢印でその方向を示した。屈折面LOを境にした左右での結晶方位のくいちがいの角 $\theta$ は約 $15^\circ$ であった。また、屈折面はO点のところで $\overline{OP}$ だけくいちがっていた。屈折面がいくつかあったかは観察されなかったが、空隙OPQの発生直後に屈折面がLOとP'Mのふたつに分れていたことは確かである。

このようにして生じた微小な三角形の内部破壊は、変形の進行に伴って次第に発達、拡大するので破壊の核の役目をする。それで、これを三角形破壊核と名づけた。六方晶系に属する金属でも、これと類似な破壊現象が知られている。たとえば、Gilman<sup>7)</sup>が亜鉛の単結晶を圧縮した際に見出した破壊核は、図版II-5, I-1の写真にしめした割れ目と極めてよく似ている。

はじめは微小な空隙であであった三角形破壊核は、その後圧縮が進むにつれて次第に発達し拡大する。破壊は図5の破壊核OPQの頂点Qから写真の右に向って特に強く進行し、図6のような大きさに拡大した。あらたに屈折面RSをはじめ、2, 3の屈折面が現われ、三角形だった空隙の形は次第にくづれてきた。その後、この空隙は益々拡大し、薄板全体の歪が0.12に達して圧縮を中断した際には図7のようになった。

このような三角形破壊の発生、発達は、多結晶氷と単結晶氷の区別なく、しばしば見られる現象である。図版I-4の写真にみられる数個の三角形破壊は、薄板状の単結晶氷に不均一な応力を与えた際に生じたものである(十字ポラロイドの下で撮影したので、空隙の部分が黒く見える)。このばあいにも三角形破壊は屈折面をともなって発生している。図版I-1の写真の中央にみられる三角状破壊PQRの頂点Pのすぐ上方、屈折面上のTと印したところにも小さな三角形破壊とそれに伴う屈折面とがみられる。

このように、三角形破壊は氷の内部破壊の主要な要素のひとつである。つぎに、その発生の機構について、転位理論を参考にしつつ簡単な考察を試みてみよう。

#### 2. 三角形破壊核の発生機構

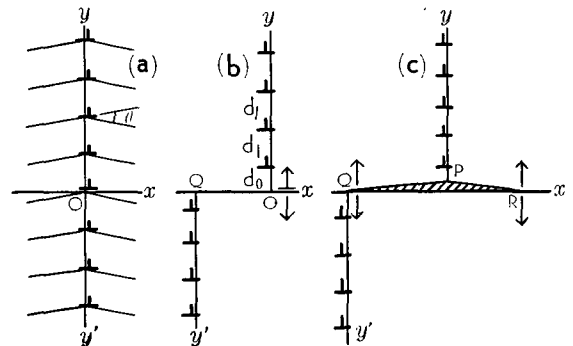
前項でものべたように、三角形破壊核はつねに屈折面を伴って発生し、屈折面を境にして隣り合う結晶方位のくいちがいが $13^\circ$ 以上に達したときに限って発生した。屈折面は、第1図(a)の $yy'$ 上に示したように、上下に並んだ刃状転位の壁で、その面を境にして左右の結晶格子が対称の関係にある(図の逆T字型は正の刃状転位、それを通る2本の細い実線は結晶底面

を示す。 $\theta$  は  $yy'$  での結晶方位のくいちがいの角である)。文献(6)の第IV節でものべたように、筆者が観察した範囲では、 $\theta$  の最大値はほぼ  $13^\circ$  のていどであった。 $\theta=13^\circ$  のばあい、上下に並ぶ隣接刃状転位間の距離は、氷の単位胞を3個、結晶主軸方向に重ねたていどである。 $\theta > 13^\circ$  になると、刃状転位間の間隔はさらにせまくなり、屈折面近傍での結晶格子の歪が非常に大きくなって、屈折面はもはや単純な対称境界ではありえなくなる。その結果、屈折面は、通常の非対称型の結晶粒界にかわるか、あるいは屈折面上のどこかに破壊がおこるかになるであろう。三角形破壊核が発生するのは、その後者のばあいと考えられる(前者のばあいは、筆者はまだ観察したことがない)。事実、図版 II-5 の三角形破壊核 OPQ が発生したときの、屈折面 LM を境にした結晶方位のくいちがいは  $15^\circ$  で、上記の  $\theta=13^\circ$  より大きい。では、屈折面上に多数の刃状転位が上下に並んだばあい、どのような機構で破壊がおこるかを考えてみよう。

第1図(a)の屈折面  $yy'$  にほぼ直角な結晶底面に劈開破壊がおこるのは、隣りあう二枚の底面を引き離すよう張力が底面に働いた結果にちがいない。図(a)に示したような転位の壁が弾性体内に存在したときの直線  $yy'$  の近傍における応力分布は転位論で求められている。今、便宜のため、 $yy'$  上の任意の点 O で屈折面を上下に分けて考える。O 点より上、 $Oy$  上に並ぶ転位による O 点近傍の底面に垂直な応力成分  $\sigma_i$  は正で張力である。O 点より下  $Oy'$  上に並ぶ転位による O 点近傍の垂直応力  $\sigma_o$  は負で圧力であるが、 $\sigma_i$  と  $\sigma_o$  の大きさは相等しい。従って、O 点近傍では、 $\sigma_o$  と  $\sigma_i$  とが互に打ち消し合い、 $y$  軸近傍では結晶底面に垂直な応力成分  $\sigma_y$  が 0 となる。このことは屈折面上のどの点でも成り立つから、屈折面が形成されただけでは、底面を互に引き離すような張力は生じない。

いま、何かの原因で、図(b)の右側に示したように、O 点から下の  $Oy'$  にそって並んだ転位は消えて、O 点から上の  $Oy$  上にだけ刃状転位が残ったばあいを考えてみよう。 $Oy$  上の転位が O 点でひきおこす垂直応力  $\sigma_y$  は、うえにのべた  $\sigma_i$  であるから張力である。従って、O 点附近には  $y$  軸に垂直な結晶底面を互に引き離すような力が働らく。この引張り応力の大きさを次に考える。

O 点から上方、距離  $d'$  だけ離れた1本の正の刃状転位による張力の O 点における値  $\sigma_y(d')$  は、 $\sigma_y(d') = \{Gb/2\pi(1-\nu)\} \cdot (1/d')$  で与えられる。ここに  $G$ ,



第1図 屈折面上に三角形破壊核が発生する機構を示す図。(a)  $y$  軸上に、同符号の刃状転位がならんだばあい、 $y$  軸をはさむ左右で結晶方位が  $\theta$  だけくいちがう。(b) 何かの理由で(a)に示した転位の壁が、ふたつの部分  $Oy$ ,  $Oy'$  にわかれると、点 O 付近には  $x$  軸にその面を引きはなすような張力  $\sigma_y$  が生じ、その結果(c)に斜線をほどこした三角形破壊核 PQR を生ずる。一たび空隙 PQR ができると、ひきつづく圧縮により、頂点 Q, R 付近では、矢で示したような張力を生じ、空隙 PQR を  $x$  軸にそって拡大する

$\nu$ はそれぞれ、氷の剛性率、ポアソン比、 $b$ は氷の結晶の底面内に含まれる転位のバーガース・ベクトルの大きさである。この転位列の下端の転位とO点との距離を $d_0$ 、各転位間の間隔を $d_1$ 、Oy上に並ぶ転位の総数を $N$ とすると、O点における引張り応力 $\sigma_y^0$ は、各転位による引張り応力を重畳したものにひとしい。すなわち

$$\sigma_y^0 = \{Gb/2\pi(1-\nu)\} \cdot \sum_{n=0}^N (1/d_0 + nd_1)$$

簡単のため、 $d_0 \sim d_1$ とすると、上式は

$$\sigma_y^0 = \{Gb/2\pi(1-\nu)\} \cdot (1/d_1) \cdot \sum_{n=1}^N (1/n)$$

となる。今、屈折面での結晶方位のくいちがいの角 $\theta$ が $13^\circ$ のときを考える。このとき、屈折面上における転位間の間隔 $d_1$ は、 $d_1 \sim 3c \sim 20 \text{ \AA}$  ( $c$ は氷の結晶の単位胞の結晶主軸方向の長さ)となる。O点に最も近い、たった1個の転位によって生ずるO点での $\sigma_y^0$ は、 $G \sim 3 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}^2$ 、 $\nu \sim 0.25$ 、 $b \sim 4.5 \text{ \AA}$ として、 $\sigma_y^0 \sim 1.5 \times 10^3 \text{ kg-wt/cm}^2$ である。実際に観察された屈折面の長さは $3 \sim 4 \text{ mm}$ なので、この面内には $d_1 \sim 20 \text{ \AA}$ として $2 \times 10^6$ 個のていどの転位が存在することになる。そこで、上式の $N$ を、 $N \sim 2 \times 10^6$ として $\sigma_y^0$ を概算で求めると、 $\sigma_y^0 \sim 3 \times 10^4 \text{ kg-wt/cm}^2$ となる。これは、O点に最も近いわずか1個の転位による $\sigma_y^0$ の値 $\sigma_y^0$ の20倍に相当する。従って、もし図(b)に示したような状態が屈折面上でおこれば、屈折面Oyに直交する面Oxを上下に引き離すような大きな張力が発生すると考えられる。Orowan<sup>9)</sup>(p. 253)も同じような考えで、疲労破壊の説明を試みている。しかし、このようなクラックの発生は、屈折面が結晶体内部に終端をもつばあいに限られる。実際に氷でみられた三角形状破壊は、もともとは上下に連続した屈折面上に発生した。筆者はこの実験事実を説明するため、次のように考えた。

よく知られているように、屈折面(小角度粒界)は剪断応力により屈折面に直角な方向に並進運動する(Parker-Washburnの実験<sup>9)</sup>)。氷の結晶についても、東<sup>10)</sup>らは同様な実験を行ない、屈折面が動くことを見出している。もし、この運動に対して何かの障害が存在したばあい(たとえば不純物など)、第1図(b)に示したように、屈折面は上下ふたつに分れうる。たとえば、同図(a)の屈折面yOy'が図の右から左に移動してきて図の位置に達したとき、上半分Oyが何かの障害物につきあつたとしよう。Oy上の転位列は運動を阻止されて、そこに一時停止する。下半分Oy'にそう屈折面は運動を阻止されることなく、そのまま左に前進しつづけ、結局屈折面yOy'は上下ふたつの部分OyとQy'に分れる。こうなると、上にのべよように、屈折面OyはO点で終端をもち、この近傍に大きな引張り応力 $\sigma_y$ を生ずる。一方、屈折面Qy'上に並ぶ転位列は、点Qの近傍に大きな圧縮応力 $\sigma_y$ を生ずるが、OQ間の距離があるていど離れていれば、 $\sigma_y$ は $\sigma_y$ と無関係と考えてよい。すると、O点附近に生じた大きな引張り応力 $\sigma_y$ により、底面(汜り面)Oxにそって底面が上下に引き離され、図(c)に示すような細長い三角形の空隙PQRが生じうる。

以上のべたことを図版IIの写真にてらしてみると次のようになる。はじめ屈折面は図のLOとその延長上にあつたが、底面にそう剪断応力によって写真の左に向って動いた。たまた

ま、その上半分 LO 上の転位が障害物によって運動を阻止されて一時停止した。下半分の転位だけは左に向って移動しつづけ、P'M の位置に達したとき下半分も障害物に運動を阻止されて一時そこに停止した。屈折面 LO と P'M がいずれも写真にみられる位置にしばらくの間停止していたことはつぎのことから確かである。写真にみえる 2 本の条痕 LO, P'M は屈折面 (小角度粒界) の氷の表面における露頭にそってできた溝である。粒界の表面における露頭は一般に通常の表面よりも蒸発 (融解) が早く進行するので、露頭にそって浅い溝ができる。しかし、溝が発達して目に見えるようになるには、あるていど長時間、粒界が同一の位置にとどまっていなければならない。図版 II-5 の LO, P'M にそって溝が観察できるのは、ふたつの屈折面がしばらくの間 LO, P'M の位置に存在して動かなかつた証拠である。LO の延長線上には、このような条痕 (溝) がみられない。これは、その線上にそって屈折面が長い間存在したことがないことを示す。以上のことから、三角形破壊核 OPQ が形成されたときには、この部分の屈折面が O 点で  $\overline{OP'}$  だけくいちがっていたことがわかる。

このような過程をへて、ひとたび氷体中に  $\triangle PQR$  のような微小な割れ目が発生すると、弾性論の教えるところにより、割れ目が発達、拡大することがわかる。細長い三角形 PQR の底辺 QR に平行に薄板を圧縮すると、鋭角の頂点 Q, R には、圧縮応力にほぼひとしい大きさの引張り応力を生ずる (第 1 図 (c) に矢でそれを示した)。この引張り応力により、頂点 Q, R で底面がさらに劈開、剝離され、割れ目 ( $\triangle PQR$ ) は漸次、左右に発達、拡大することになる。以上が三角形破壊の発生とその拡大に対する説明である。

#### IV. 間歇的に進行する破壊

##### 1. 間歇的に進行する破壊の例

単結晶氷の薄板を、結晶底面に平行か平行に近い方向に一定速度で圧縮すると、底面に平行な割れ目が圧縮板と氷との接触点ふきんで発生する。圧縮の進行にともない、割れ目の先端は、底面にそって前進し、破壊が拡大する。この際、割れ目の先端は連続的に前進するのではなく、1 mm ないし数 mm ていど前進しては一旦停止し、しばらくのち再び前進、また停止する。このような不連続的、間歇的な破壊の前進は、結晶底面にそっておこることが多いが、柱面、あるいは他の面にそっておこることもある。また、この型の破壊は、単結晶氷だけでなく多結晶氷を圧縮した際にも観察される。多結晶氷のばあいも、この種の破壊は、底面が圧縮方向に平行か、それに近いような結晶粒内にみられる。その際、破壊は、主として結晶粒界から直接発生する。しかし、氷体内でおこった粒界剝離が伝播してきて、そのまま底面の間歇的な破壊になることも稀ではない。図版 III-9 の写真は、ふつうの多結晶氷から切りだした薄板 (厚さ約 0.8 mm) を、写真の左右の方向に圧縮したばあい、ある結晶粒におこった間歇的に進行する破壊の例である。図 III-9 は、圧縮中のある瞬間に撮影した破壊の先端附近の偏光顕微鏡写真であり、図 III-10 は、それからしばらくのちにとつた同一部分の写真である。この結晶粒の結晶主軸 (c 軸) 方向は、図 9 の左端近くに矢で c と印した通りで、ほぼ薄板の面内に含まれていた。結晶底面は c 軸に直角で、底面に平行に多くの迂り線がみえる。写真の右の方から進行し

てきた破壊の先端は、K 点で一時停止していた。割れ目は底面にそって真直ぐに進んできただけでない。わずかづつではあるが、底面に直角な結晶柱面にそっても、しばしば破壊が進んだあとがみられる。また、図の R と印したところには、柱面にそう小さな枝わかれした割れ目もみられる。破壊の先端には、屈折面 KJ が形成され、それを境に迂り線が角度にして約  $10^\circ$  折れ曲っている。この種の破壊の先端にはほとんど例外なく、割れ目に垂直な方向に屈折面を伴っており、屈折面は割れ目とともに前進する。圧縮のすすむとともに、破壊の先端は、点 K から図 10 の点 N まで底面にそって前進し、そこから結晶柱面にそって写真の上方に向って進んだ。そこで、さらに進行方向をかえながら前進したのち、先端は点 M に達し、それとともに屈折面も図の ML まで前進した(図 9 にみられる屈折面 KJ は、図 10 に KJ と印したところによって、その痕跡がみとめられる)。

今のべた例は、多結晶氷体内の、結晶底面が圧縮方向に平行に近い結晶方位をもつ結晶粒におこった、底面の劈開による破壊の例であった。この種の破壊は、結晶底面が圧縮方向と平行な結晶方位をもつ単結晶氷を圧縮した際にもみられる。図版 III-11, 12 の写真はその例である。このばあい、破壊は圧縮板と氷との接触面の中心付近でおこりはじめ、圧縮の進行とともに結晶底面にそって漸次拡大するのがふつうである。薄板は単純圧縮をうけているので、主応力方向は圧縮方向(及びそれに直角な方向)と一致する。従って、結晶底面は主応力方向と一致し、底面にそう剪断応力は 0 となり、底面迂りによる塑性変形はおこりえない。それで、圧縮が進めば、底面以外の面での迂りがおこるか、破壊がおこるか以外には変形の路がない。氷は塑性的に非圧縮体だからである。つぎに、このようなばあいの破壊の発生、進行、拡大について、簡単な考察を加える。

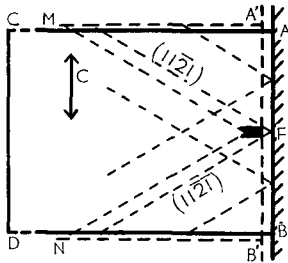
## 2. 破壊核の発生と発達

多結晶氷を圧縮したばあいには、前節でのべた三角形破壊核をのぞき、破壊は大部分、結晶粒界でおこった。図版 III-9 の写真にかかげた破壊も、結晶粒界で発生、発達したのである。隣りあう結晶方位のことなる結晶粒が独立に底面迂りによって変形する結果、結晶粒界で物質の不連続すなわち空隙が生じ易い。これが多結晶氷におこる内部破壊の多くが結晶粒界でおこる理由である。

結晶粒界が存在しない単結晶氷では、上の議論はなりたたない。そこで、結晶底面の方向に単結晶氷の薄板を圧縮したばあいの破壊核の発生について、次のように単純に考えた。このばあい、底面迂りによる変形はありえない。迂りによる変形がおこるとすれば、結晶柱面か結晶錐面においてかである。最近、黒岩<sup>11)</sup>らは氷の表面に作った蝕像を研究した結果、氷が柱面や錐面にそっても迂りうる可能性のあることを示した。実際に Gold<sup>12)</sup> は柱面迂りを観察したのべている。筆者も単結晶氷の薄板を底面方向に一定速度で伸張した際、図版 II-8 の写真にみられるように、結晶柱面での迂りをみとめた。伸張は、写真の左右の方向になされた。結晶主軸(c 軸)の方向は、図に c と印した矢で示してある。伸張がすすんで、引張り応力が  $15 \text{ kg-wt/cm}^2$  をこえたころ、写真の P, Q, R と印した部分に、c 軸に平行および直角な方向にはしる折れ線の模様があらわれた。折れ線のうち、c 軸に平行な部分は柱面すべりのために氷の表

面にできた沁り線と考えられる\*。やがて、引張り応力が  $17.6 \text{ kg-wt/cm}^2$  に達したとき、写真の LM にそう結晶柱面でこの氷は破断した。

このように、底面以外の結晶面でも沁りうることはわかったが、その沁りの氷の変形に対する寄与は、一般に底面沁りに比べてはるかに小さい。しかし、底面沁りがおこりえないよう



第2図 結晶底面での沁りがおこりえないような方法で単結晶氷を圧縮したばあいには、たとえば結晶錐面(破線で示す)で沁りがおこる結果、破壊核(黒くぬりつぶした部分)が発生しうることを示した図。矩形薄板状の氷 ABDC のうち、右半分を主に書いてある

な特別なばあいには、この種の沁りも、変形の初期の段階において重要な役割を演ずると考えられる。

第2図に、結晶底面によって圧縮しつつある単結晶氷の薄板 ABDC を略図で示した。図には、薄板の右半分だけを主に示してある。結晶底面には剪断応力が働かないが、柱面  $\{10\bar{1}0\}$  や結晶錐面  $\{11\bar{2}1\}$  には剪断応力が生じ、氷はその面によって沁りうる。たとえば、図に細い破線で示した錐面  $(11\bar{2}1)$ ,  $(11\bar{2}\bar{1})$  によって沁りがおこる結果、薄板が太い破線 MA'B'N で示したように変形したとする。この際、沁り量は光学顕微鏡で判別しえないほど僅かであってもよい。とに角、図の F 点ふきんに黒くぬりつぶした部分に微小な空隙を生ずる。いったん空隙ができると、圧縮によってその先端付近には張力が生ずる。最大張力は空隙の先端に垂直な面に対して現われ、空隙が圧縮方向に非常に細長いばあいにおける値は、圧縮応力の値にひとしいこ

とが知られている。空隙(割れ目)は、この張力によってさらに拡大し、圧縮の進行に伴って漸次前進するのである。

### 3. 破壊の间歇的な伝播

前にものべたように、この種の破壊は連続的に拡大、発達するのではなくて、伝播が间歇的である。破壊がある距離すすむと、破壊の先端附近の応力が緩和し、割れ目は一時進行を停止する。ひきつづく圧縮によって割れ目の先端を引き裂こうとする張力が漸次増加し、ふたたび破壊値に達すると割れ目はまた前進する。図版 III-11, 12 にはその一例をかかげた。用いた試料は厚さが  $1 \text{ mm}$  の単結晶氷の薄板で、圧縮は写真の左右にそって結晶主軸(c軸)に垂直になされた。薄板の右端に発生した結晶底面にそう破壊は、圧縮の進行とともに左に向って间歇的に前進して、図11のP点でとまった。偏光顕微鏡で観察していると、割れ目がP点に達するとまもなくP点の近くに色のついた模様があられ、圧縮の進行とともに次第に明瞭になった。図11の写真にそれがみられる。このような色模様が生ずるのは、その部分での応力分布が一様でないことの証拠であり、これは氷の結晶体に生じた光弾性効果と考えられる。さきののべたように、圧縮方向に生じた細長い割れ目の先端には張力を生じ、単純圧縮の応力分布がみだされる。しかし、色模様のついた部分が割れ目のごく先端部に限られていることから、応

\* このことから、結晶柱面沁りの臨界剪断応力は約  $7 \text{ kg-wt/cm}^2$  のていどと考えられる。この値を底面沁りの約  $200 \text{ gr-wt/cm}^2$  とくらべると、極めて大きな値で、柱面沁りが一般におこり難いことを示すものである。

力分布の乱れがごく局部的なものであることがわかる。また、割れ目が前進した直後に氷がこのような光弾性を示さないのは、破壊によって応力が一時緩和されることを示すにほかならない(氷における光弾性効果については、氷の塑性変形に関する報告 VI でくわしくのべる予定である)。

図 11 の写真をとった直後、図 12 の写真に示したように、 $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow S$  と印した経過をへて割れ目の先端が S に達し、そこでまた一旦停止した。それとともに、割れ目は上下にひらきはじめた。図 12 の写真で、薄板上に見える直線状の匏のきずあと LM が、R のところでくいちがったのがわかる。割れ目の先端 S には再び光弾性効果による色模様が変わりはじめた。 $Q \rightarrow R \rightarrow S$  にそう破壊は進行方向が一定していない。ただ、Q から Q' に向う方向と、R から R' への方向とが平行に近く、また、Q' から R、R' から S への方向がほぼ平行なことに気づく。 $\overline{QQ'}$ ,  $\overline{RR'}$ ,  $\overline{Q'R}$ ,  $\overline{R'S}$  が結晶底面 (0001) となす角を測定すると、それぞれ  $60^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$  である。破壊面  $\overline{QQ'}$ ,  $\overline{RR'}$ ,  $\overline{Q'R}$ ,  $\overline{R'S}$  が氷の結晶錐面のうちのどの面に対応しているかを調べてみよう。破壊は一般に次数の低い結晶面にそっておこると考えられている。それで、次数の低い結晶錐面  $(10\bar{1}1)$ ,  $(10\bar{1}2)$ ,  $(11\bar{2}1)$ ,  $(11\bar{2}2)$  に結晶底面とのなす角を求めてみると、それぞれ、 $62^\circ$ ,  $43^\circ$ ,  $73^\circ$ ,  $58.5^\circ$  となる。したがって、面  $\overline{QQ'}$ ,  $\overline{RR'}$  にそう割れ目は、 $(10\bar{1}1)$  または  $(11\bar{2}2)$  の面におこった劈開破壊と考えられる。しかし、 $\overline{Q'R}$ ,  $\overline{R'S}$  にそう破壊がどのような結晶錐面にそっておこったかはわからない。

## V. 要 約

数年来、筆者は、いろいろな氷から切りだした薄板状の氷 (2~3 cm 角、厚さ約 1 mm) を単純圧縮(伸張)し、氷体におこる諸変化を偏光顕微鏡の下で追跡した。氷の塑性変形に関することはすでに報告した通りであるが、この報告では、塑性変形と同時に氷体内に観察された内部破壊をとりあげた。氷の薄板に与えた歪速度は 10%/時のていどで、実験はすべて  $-5^\circ\text{C}$  に調節された恒温槽内でおこった。得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 氷におこる破壊の型は、通常物質にみられるのと同様、粒内破壊、粒界破壊、粒間破壊であるが、これらをさらにこまかく分類することができる(第 II 節)。

2. 粒内破壊のうち、三角形状破壊核の発生と発達、拡大が顕著であった。三角形状破壊核は、氷体内に形成された屈折面上で、屈折面に垂直な結晶底面が劈開、剝離することによって発生する。その発生機構を転位論の立場から考察した(第 III 節)。

3. 氷を結晶底面に平行に圧縮すると、底面にそう劈開破壊がおこる。圧縮にともなう破壊の進行は間歇的であり、割れ目が大きくなると、結晶柱面あるいは結晶錐面にそっても進行するようになる。この種の破壊の核の発生、発達、拡大について簡単に論じた。また、氷を結晶底面に平行に伸張すると、結晶柱面での劈開破断がおこる。破断の前には、結晶柱面での氷りが観察された(第 IV 節)。

おわりに、御指導していただいた吉田順五教授に厚く御礼を申し上げます。また、当研究所の雪氷研究グループの方々には、いろいろと御討論していただいたことに感謝致します。

この研究に費した費用の一部は、文部省科学研究費から支出された。

## 文 献

- 1) Шумский, П. А. 1955 Основы Структурного Ледоведения. Академия Наук СССР. Москва. 492 pp.
- 2) Matsuyama, M. 1920 On some physical properties of ice. *Jour. Geology*, **28**, 607-631.
- 3) Nakaya, U. 1958 Mechanical properties of single crystals of ice. *SIPRE Research Report* **28**, 1-44.
- 4) Glen, J. W. 1955 The creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc., London*, **A. 228**, 519-538.
- 5) 若浜五郎 1962 氷の塑性変形について. I~IV. *低温科学, 物理篇*, **20**, 57-130.
- 6) 若浜五郎 1964 氷の塑性変形について. V. *低温科学, 物理篇*, **22**, 1-24.
- 7) Cottrell, A. H. 1959 Theoretical Aspects of Fracture. *In Fracture*. (B. L. Averbach, ed.). M.I.T. Press, Cambridge, Mass. and John Wiley & Sons, Inc., N. Y. 20-53.
- 8) 横堀武夫 1955 材料強度学. 技報堂, 東京, 253 pp.
- 9) Cottrell, A. H. 1953 Dislocations and Plastic Flow in Crystals. Oxford. 223 pp.
- 10) Higashi, A. and Sakai, N. 1961 Movement of small angle boundary of ice crystal. *Jour. Phys. Soc., Japan*, **16**, 2359-2360.
- 11) Kuroiwa, D. and Hamilton, W. L. 1963 Studies of ice etching and dislocation etch pits. *In Ice and Snow*. (W. D. Kingery, ed.). M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 34-55.
- 12) Gold, L. W. 1963 Deformation mechanisms in ice. *In Ice and Snow*. (W. D. Kingery, ed.). M.I.T. Press, Cambridge, Mass., 8-27.

## Summary

Thin (1 mm) rectangular ( $2 \times 3 \text{ cm}^2$ ) plates were cut from single crystal and polycrystalline ice and laterally compressed or extended at constant slow speeds at  $-5^\circ\text{C}$  (strain rate  $\dot{\epsilon} \sim 10\%/hr$ ). The deformation occurring in these crystals was observed with a polarizing microscope during the process of deformation. Some of the deformation processes, such as slip on the basal planes or at grain boundaries, and the migration of grain boundaries, have already been reported in earlier papers (Plastic deformation of ice, I-V). Those deformation processes do not break the continuity of the crystal texture. In this paper, the various kinds of internal fracture which accompany the processes of plastic deformation are reported. These fractures may be classified as follows:

- i Intra-granular fracture;
  - a. Formation of a triangular nucleus of fracture and its development (Pl. I-1).
  - b. Trans-granular fracture, which starts from the grain boundary and instantly traverses the grain from boundary (Pl. I-2).
  - c. Cleavage fracture which proceeds primarily, and intermittently, along the basal plane. The course of the cleavage often deviates from the basal plane to the prismatic or pyramidal planes (Pl. III-9~12).
- ii Grain-boundary fracture; During compression of a polycrystalline ice plate, the grain boundaries often separate to form cavities (Pl. I-3). These fractures have been reported in an earlier paper (Plastic deformation of ice, V).
- iii Intercrystalline fracture; fracture which runs through several of the grains com-

posing polycrystalline ice.

Of the fractures mentioned above, nucleation of the triangular fracture and the cleavage fracture are described in this paper.

### 1. Initiation and development of triangular fractures.

In the early stage of compression of an ice plate, bend planes (small angle grain boundaries) are formed perpendicular to the slightly bent basal planes. When the angle between the orientations of the lattices on either side of the bend plane,  $\theta$ , exceeds approximately  $13^\circ$ , a small triangular crack often starts from a point on the bend plane and extends along a basal plane, as is illustrated in Photograph 5, Plate II. Such a crack must be produced by a large tensile stress acting so as to separate the crystal at the basal plane. Since a bend plane consists of edge dislocations of the same sign, arranged on a plane as is shown in Fig. 1 (a), it can move parallel to the basal planes under shear stress. However, the movement of bend plane is inhibited when it encounters an obstacle in the crystal and a part of the bend plane is stopped while the rest keeps moving. This separates the bend plane into two parts with a displacement between them, as is shown in Fig. 1 (b). The array of edge dislocations on the upper bend plane, Oy, produces a large tensile stress  $\sigma_t$  around its lower end, which may be expressed as,

$$\sigma_t = \{Gb/2\pi(1-\nu)\} \cdot (1/d) \cdot \sum_{n=1}^N (1/n). \quad (1)$$

where  $G$  is the modulus of rigidity of ice,  $\nu$  for Poisson's ratio of ice,  $b$ , the magnitude of the Burgers vector of an edge dislocation located on the basal plane of ice crystal,  $d$ , the spacing between neighbouring dislocations, and  $N$ , the total number of dislocations on the plane, Oy. The value for  $d$  ( $\approx 20 \text{ \AA}$ ) can be deduced from the angle of bend  $\theta$  ( $\sim 13^\circ$ ) which the basal planes make at the bend plane. The number of dislocations,  $N$ , estimated from  $d$  and the length of the bend plane in the direction of Oy ( $3\sim 4 \text{ mm}$ ), is found to be of the order of  $10^6$ .

Substitution of the numerical values of the constants into equation (1), gives  $3 \times 10^4 \text{ kg-wt/cm}^2$  for  $\sigma_t$ . Tensile stress of this magnitude will be sufficient to separate the crystal and to produce the slender triangular crack shown in Photo. 5, Plate II. Once such a crack is formed, it develops along the basal plane since the tensile stress becomes concentrated at the ends of the crack.

### 2. Cleavage fracture.

This type of fracture was typical in single crystal ice plates when they were compressed perpendicular to their c-axes. A crack appeared close to the edge of the ice plate, advanced instantly for a short distance and stopped. As soon as the tip stopped advancing, isochromatic patterns became visible as is illustrated in Photos. 11 and 12, Plate III. This is an indication of an increase in the tensile stress around the ends of the crack. With further compression, the isochromatic patterns became clearer and clearer. As the crack suddenly extended, the isochromatic pattern disappeared.

## 図 版 説 明

## 図版 I 氷の薄板を圧縮した際にみられた氷の内部破壊の例

- 1 三角形破壊  $\triangle PQR$  が顕著な底面 $\bar{P}$ と多数の屈折面をともなって発生した
- 2 粒内横断破壊の例
- 3 三叉粒界でおこった粒界破壊の例
- 4 単結晶氷の薄板に生じた一群の三角形破壊

## 図版 II

- 5, 6, 7 三角形破壊核の発生とその発達, 拡大の過程を示した。5は小さな破壊核  $\triangle OPQ$  が発生した直後。屈折面  $LO$ ,  $P'M$  が  $O$  点で  $\overline{OP'}$  だけくいちがっている。6, 7はこの破壊核がその後の圧縮によって発達して行く過程を示す。写真はいずれも偏光下でとった
- 8 底面方向に伸張した単結晶氷にみられた結晶柱面での $\bar{P}$  ( $P, Q, R$  と印した部分) と、柱面でおこった破断 ( $LM$ )

## 図版 III 間歇的に進行する破壊

- 9, 10 9は破壊の先端が  $K$  に達し, 進行を一時停止しているところ。屈折面  $KL$  を伴っている  
10はひきつづく圧縮により, 破壊の先端が  $K \rightarrow N \rightarrow M$  と進み, 再び停止したところ
- 11, 12 破壊の先端附近に光弾性効果による色模様がみられる。破壊が圧縮方向と平行な結晶底面にそって進行し, その先端が  $P$  点に達して一時停止した。11は, ひきつづく圧縮により先端附近に色模様が現われたところを示す。つぎの瞬間, 破壊は  $P \rightarrow Q \rightarrow Q' \rightarrow R \rightarrow R' \rightarrow S$  と進んだ。やがて先端  $S$  に再び色模様が現われたところが 12 である  
(圧縮はすべて, 写真の左右の方向に行なわれた)

