HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	氷の曲げ試験
Author(s)	若浜, 五郎; WAKAHAMA, Gorow
Citation	低温科學. 物理篇, 17, 87-97
Issue Date	1958-12-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/17946
Type	departmental bulletin paper
File Information	17_p87-97.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Gorow WAKAHAMA 1958 Bending Tests on Rectangular Plate of Ice. *Low Temperature Science, Ser. A, 17.* (With English résumé p. 96)

氷の曲げ試験*

若浜五郎
(低温科学研究所　気象学部門)

(昭和33年7月受理)

氷は，急激な変形に対しては甚だ弱く，すぐ破壊をおこすが，ゆつくり変形させた場合には，自分自身の形を変えて，水あめのように変形する。たとえば角型に切つた氷の棒の両端を支え，中央に適当な荷重を加えると，数時間で大きく弯曲してしまう。

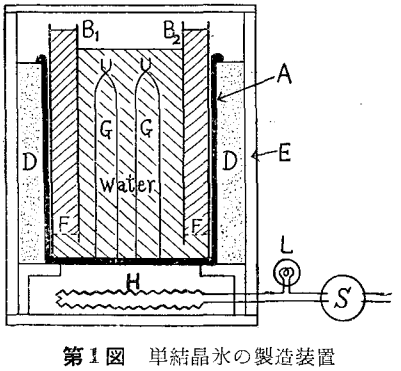
しかし，いろいろな種類の氷について，このような曲げ試験を行つてみると，変形の様子は決して単純ではない。円弧状に変形するもの，V字形に変形するもの，左右非対称に変形するもの，非常に変形し難いものなど多種多様である。

最近，低温実験室内で相当大きな単結晶氷（長さ17～18 cm，直径3～4 cm）を製造することに成功した。この単結晶氷と，ふつうの多結晶氷を用いて上に述べたような曲げ試験を行い2，3の興味ある結果を得たので，それをここに報告する。

I. 単結晶氷の作成

単結晶の氷を用いて曲げ試験を行うには，少なくとも10～15 cmの長さの単結晶氷が必要である。大きな単結晶氷を人工的に作ることは，昔からかなり困難なこととされていたが，近時いろいろな方法で単結晶氷を作れるようになつて来たと伝えられる。我々もGriggs-Coles[1]の行つた方法を改良して試みた結果，かなり大きな単結晶氷の製造に成功したので，その方法を少し詳しく述べよう。

単結晶氷の製造装置の略図を第1図に示す。Aは40 cm×18 cm×15 cmのブリキ製の四角な製氷罐である。B_1，B_2はAの両側面に立てかけた，大きさ43 cm×15 cm×4 cmのふたつのブリキの箱で，その下端に作つた隙間によつてAの内部と通じている。B_1，B_2の用途は後に述べる。Dは厚さ5 cmの断熱用スチロポールで，罐Aの四囲をとりかこむ。Eは厚い木製の箱で，その下部に5～10ワットのヒーターHを蔵している。Gは直径3～4 cmのガラス管で，上端に直径0.5 mm位の



第1図　単結晶氷の製造装置

* 北海道大学低温科学研究所業績　第455号

小さな孔をもつ喉部がある。単結晶氷はこの管内に出来るのである。

容器A，箱B_1，B_2，ガラス管Gなどを充分よく洗滌した後，水をAに一杯入れる。このままAを火にかけて充分しや沸して，水にとけ込んだ空気を追い出す。Aにポリエチレンのふたをして，空気がとけ込むのを防ぎつつ，まず+10°Cになるまで冷却し，そこで水を適当に減らす。それから罐Aを木箱の中に収める。次に箱B_1，B_2に流動パラフィンと石油の混合液（混合比 3:1位）を静かに注入する。この混合液と水の接触境界面が，管$B_1(B_2)$の下部の隙間のすぐ上に来るまで（図の点線F）混合液を入れる（あらかじめ何リットル入れればよいかを調べておけばよい）。この混合液は，A内の水が表面から凍るときの体積膨脹による圧力上昇を緩和する圧力抜きである。混合液を入れおわつたとき，罐A内の水の表面は，ガラス管の上端から約1cm位上の面に来るようにする。この際，ガラス管の内部に気泡が入つていないかどうかを確かめる。入つていたら，ポリエチレンのパイプで吸い出せばよい。ここで装置全体を−10°C位の低温実験室内に入れる。数時間たつた時，ヒーターHに電流を通ずる。

水の表面の温度が0°Cになつた時，小さな単結晶氷を吊り下げてseedingする（しなくてもよいが，した方が成績がよいようである）。水は表面から凍結をはじめ，凍結面は次第に深く進んで行く。それと共に，油と水の境界面Fが次第にB_1，B_2の内部を上昇して来るから，活栓つきビユレットを$B_1(B_2)$内に静かにさし込んで，上昇した分の水を吸い出してしまう。こうしないと，この部分の水が凍結して，油が圧力抜きの役目をしなくなつてしまうことがある。表面から進行して来た凍結面は，やがてガラス管Gの頭部に達し，細い孔を通り抜ける。この孔から最初に抜け出した細い氷の先端の結晶軸の方向に支配された氷が，次第にGに発達する。管Gの外に出来るふつうの多結晶氷に邪魔されることなく，G内に出来た氷は同じ結晶軸を保ちながら，Gの下部に到達する。

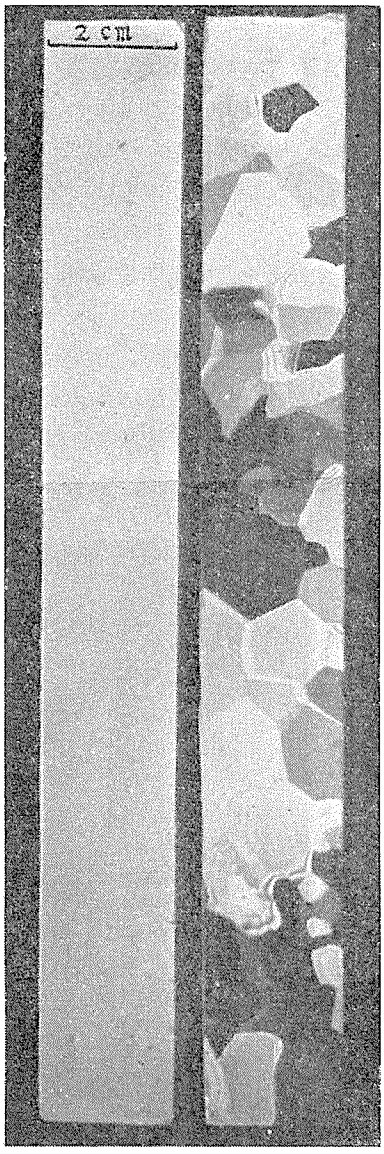
良質の単結晶を得るためには，時間をかけてゆつくり凍らせることと，衝撃を与えてA内の成層した水をかき乱したりしないことが必要である。室温が低くすぎて凍結が早すぎるときには，スライダックSで適当に電熱線Hの電流を増せばよい。

9割位の水が凍結したとき，箱ごと低温室からとり出して，なるべく温度の低い（+10°C）場所においておく。

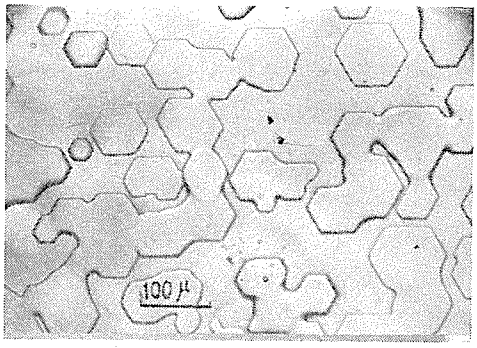
これ以後の操作で最も大切なことは，氷に機械的及び熱的衝撃を与えないことである。数時間たつてから油を全部吸い出す。更に数時間たつて，表面の氷がややとけかかつて来たころ製氷罐Aを箱から抜き出し，そのまましばらく放置する。表面の氷が更にとけて来たころ，罐Aをさかさにすると，中の氷はB_1，B_2ごと次第に外に出て来る。このころになると，氷に+15°C位の水を直接かけても氷に割れ目などは入らない。のこぎりで注意深く外側の氷を切りとり，（ガラス管に直接接触している氷まで切りとつてはならない）ガラス管Gの頭部附近の氷に水をかけてとかしながら頭部を軽く押していると，やがてガラス管は氷のブロックの中から，するりと抜け出て来る。静かにガラス管内の氷をとり出して低温室内に保存する。こうして出来た氷を偏光下で観察すると，光学的に単結晶であることがわかる。出来た単結晶氷の1

例の偏光写真を第2図に示す。比較のためふつうの多結晶氷を一緒に並べてある。

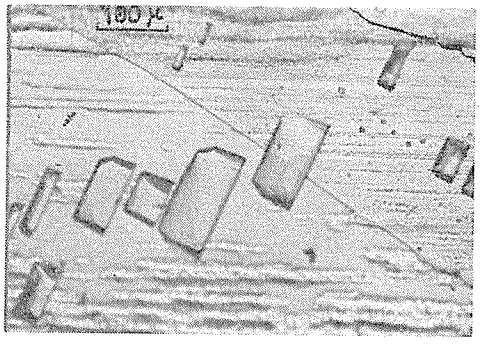
結晶軸の方向を調べるのには，樋口[2]，六車によつて発展された Formvar の被幕による熱腐蝕 (Thermal etching) の方法を用いた。この方法は処理が簡単な上に，正確に結晶軸をきめられる甚だ便利な方法である。出来た氷の一部を切りとつて，3% の Formvar 溶液を塗つて



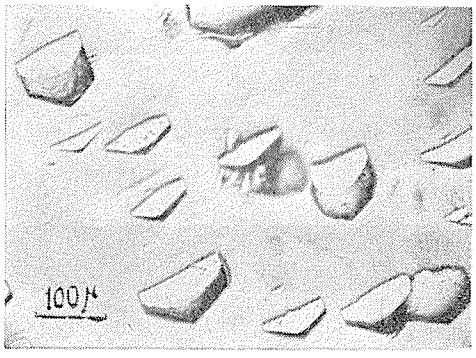
第2図　左が人工単結晶氷の1例。比較のためふつうの多結晶氷と並べてある。長さ 17 cm。偏光による写真。



(a)



(b)



(c)

第3図　氷の表面に作つた熱腐蝕孔
(a) C軸が紙面に垂直な場合。(b) C軸が紙面内にある場合。(c) C軸が紙面に対して傾斜している場合。

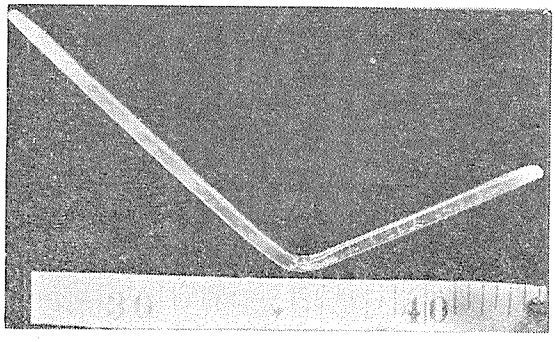
おく。一晩か二晩たつてから表面を顕微鏡で調べると，到るところに熱腐蝕孔 (Thermal etch pit) が出来ている。その 2, 3 の例を第 3 図に示した。こうして，あらかじめ結晶軸の方向を調べておいてから，結晶軸が所定の方向をもつ長さ 12～20 cm，巾 2～2.5 cm，厚さ 5～10 mm の実験試料を高速回転鋸で切り出した。

II. 単結晶氷の変形

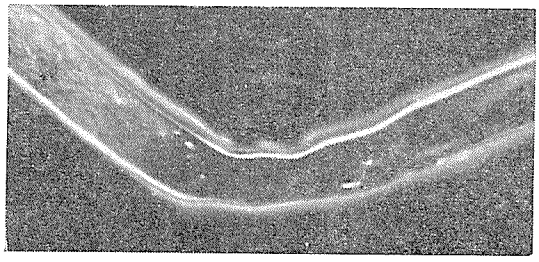
氷の単結晶は結晶主軸 (C 軸) に垂直な面に沿つて辷り易い。この辷り面と荷重方向，すなわち鉛直方向との関係によつて，氷の試料は非常に容易に曲つたり，もしくは曲り難くなつたりした。この種の実験は今までにもしばしば行われており，Mügge の実験がよく引用される。最近では中谷[3] が氷河の単結晶氷を用いて特に詳しく実験を行つた。以下，筆者の行つた実験の結果を，辷り面の向きによつて試料を分類して述べよう。

(i) 辷り面が試料の長軸と垂直に交わつている場合。すなわち，C 軸が長軸方向と一致している場合。

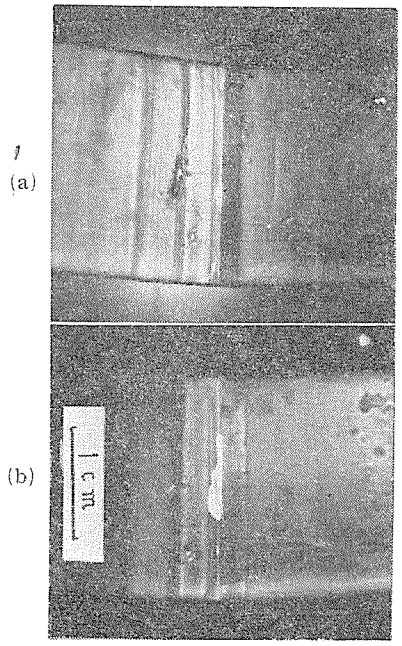
巾 20 mm，厚さ 5.1 mm の試料を距離 19 cm のふたつの刃の上に横たえ，中央に 300 g の分銅をかけた。荷重後 1 時間もすると，試料の中央附近の一部に弯曲がみとめられ，その後その部分だけが大きく弯曲して，全体として V 字形に変形した (第 4 図)。弯曲部を横から見ると，表面が波うち，他の部分よりずつと薄くなつているのがわかる (第 5 図)。偏光下で観察す



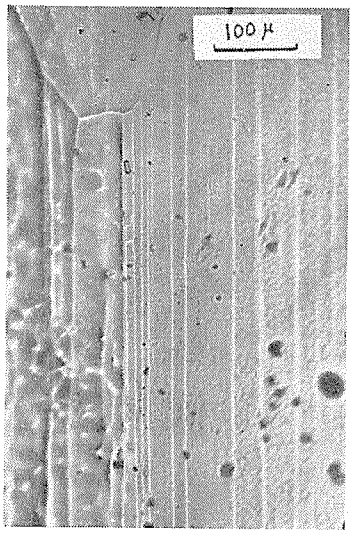
第 4 図　C 軸が長軸方向と一致している場合の単結晶氷の彎曲。



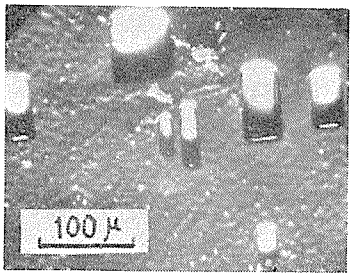
第 5 図　単結晶氷の彎曲部の拡大写真。



第 6 図　(a) 彎曲部に発生した再結晶粒。数日後観察すると，成長して (b) の大きさになつた。

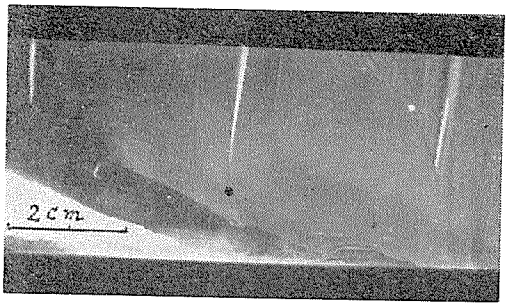


(a)



(b)

第7図 (a) 彎曲部の上表面に観察された辷り線。左上隅に見える結晶粒は再結晶によつて生じた新しい結晶粒である。(b) 同上部分に作つた熱腐蝕孔。



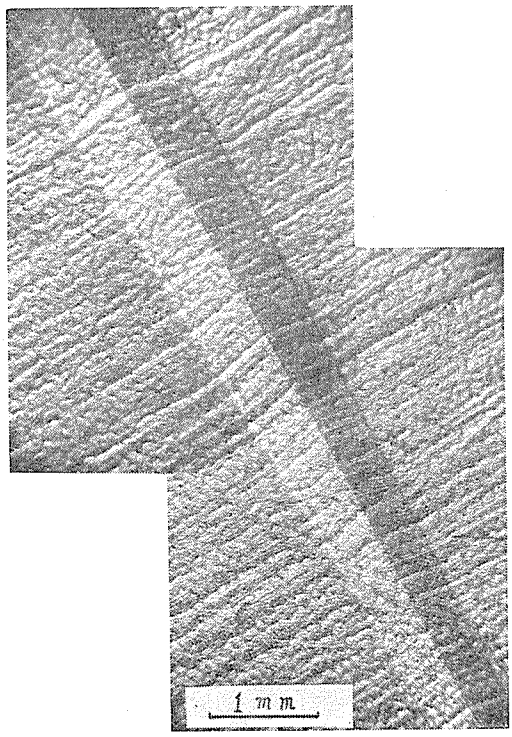
第8図 C軸が試料の巾の方向と一致している単結晶氷を僅かに彎曲させたとき，試料の上面に現われた「しわ」(偏光)。

ると，最大弯曲部には小さな異質の結晶粒が発生しているのがみとめられた。第6図(a)の中央に白く見えるのがそれである。弯曲によつて生じた内部歪を解消しようとして生じた再結晶粒であろう。数日後に観察すると，この結晶粒は第6図(b)に見られるように大きくなつていた。

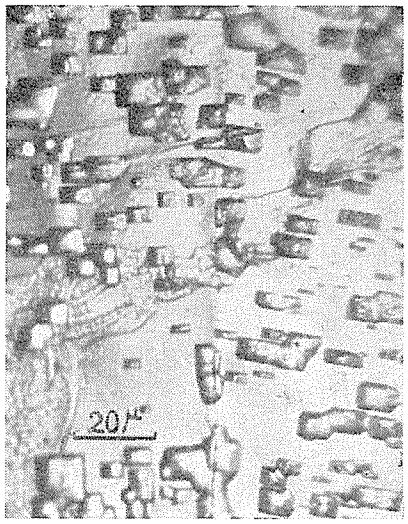
このあたりを更に拡大してみると，第7図(a)のような辷り線が見られる。左上隅の不規則な形の部分は，第6図の白い再結晶粒の下の端である。第7図(b)は辷り線の附近の腐蝕像である。これを見ると，腐蝕像の基底面が辷り線の方向と一致していることがわかる。

(ii) 辷り面が試料の長軸を含む垂直面内にある場合。すなわち，C軸が試料の巾の方向と一致している場合。

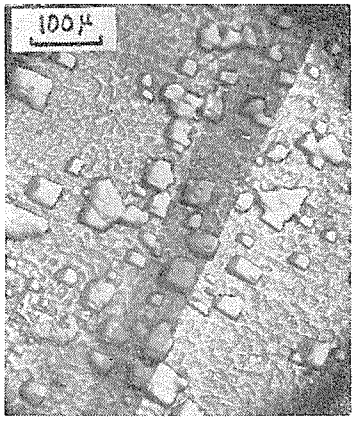
この場合は氷は極めて変形し難い。巾22.2 mm，厚さ6.4 mm，両刃端の長さ17.0 cmの試料の中央に1 kgの分銅をかけて約18時間放置しても，変形はほとんど認められなかつた。更に数時間1.8 kgの分銅をかけておいたところ，ほんの僅かの変形をおこした。このとき偏光下で観察すると，試料の上面の数カ所に明瞭な「しわ」を生じているのが見られた(第8図)。その一部を拡大したものが第9図である。試料を研磨したとき生じた表面の条痕によつて，しわの部分とその外とでは，結晶軸の方向が水平面内で約10°の食い違いを生じたことがわかる。腐蝕孔を作つてみると，このことが更にたしかめられる(第10図)。第9図を見ると，しわの部分はいかにも盛り上つているように見えるが，実はほとんど盛り上つていないのである。この試料に，更に1.5 kgの分銅をかけて放置しておいたところ，遂には第11図に示しすようにプロペラ状にねじれをおこしながら弯曲した。圧縮変形のため行きどころのなくなつた部分の氷が，氷の両側面に向つてはみ出しているのが明瞭にわかる(第12図)。この氷の板が弯曲したときのようすを立体的に見たのが第13図



第9図 しわの部分の一部拡大。

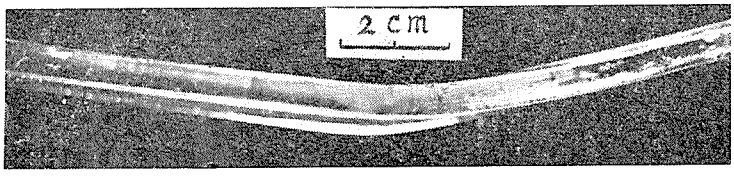


(a)



(b)

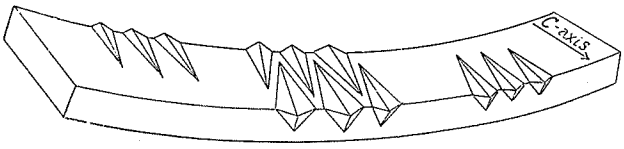
第10図 しわの部分に作つた腐蝕孔。C軸がしわの中心軸方向と大体一致してはいるが，しわの内外で約10°の食い違いを起しているのがわかる。



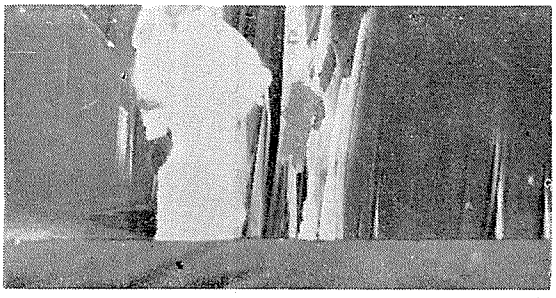
第11図 第8図に示した試料を更に彎曲させると，この図のように「ねじれ」を起した。

である。板の中央では，しわは両側面から互い違いにのびているが，右半分では，しわは板の手前側だけに生じ，左半分では板の向う側だけに生じている。このようにしわを生じながらねじれをおこしたのである。この試料を −10℃の室に10日間放置したところ，最大弯曲部に大きな再結晶をおこした。これを第14図に示した。

第12図　第8図に示した氷を更に彎曲させると「しわ」がずつと増えた（偏光）。



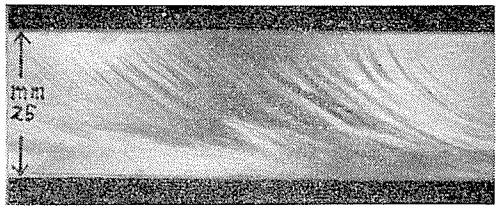
第13図　C軸が試料の巾の方向を向いている単結晶氷の板を彎曲させたとき，氷の表面に生じたしわのようす。



第14図　第12図に示した試料を約10日間放置したとき，最大彎曲部に生じた再結晶。

(iii) 辷り面が水平な場合 (C軸が上下方向を向いている場合)。

試料 1: 巾 19.7 mm, 厚さ 6.1 mm。両刃端の距離 17.0 cm。この試料の中央に 1 kg 分銅をかけたまま 9 時間放置しておいても，ほとんど変形を示さなかつた。



第15図 C軸が上下方向を向いている単結晶氷内部に巻雲状の模様が一面に入つていた (偏光)。

試料 2: 巾 25.3 mm, 厚さ 6.8 mm。偏光でみたところでは単結晶ではあるが，第15図にみられるように，内部に巻雲のような模様がみられた。両刃端の間隔を 17.0 cm とし，中央に 830 g の分銅をかけて 19 時間放置したところ，僅かな変形が認められたにすぎなかつた。しかし荷重を一挙に 2 kg に増したら，試料は左端に近いところで急速に弯曲しはじめ，第16図に示したような状態になつた。この大きく曲つたところは，異質の結晶粒が混在していた部分で，この部分に腐蝕孔を作つてみると，辷り面は幾分水平から外れていることがわかつた。(i), (ii) のばあいと違つて，このばあいには試料の表面には何ら注目すべき現象も認められなかつた。中谷は氷河の単結晶氷を使つたのであるが，筆者の人工単結晶では上に述べたように曲りにくかつた。

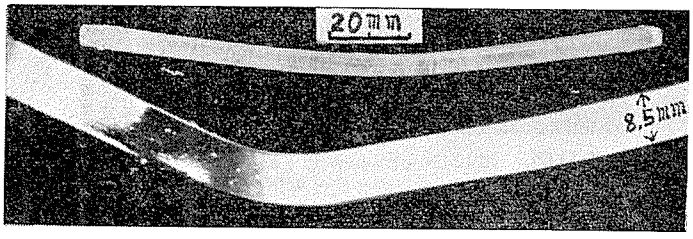
人工単結晶には結晶欠陥が多いことが予想されるので，氷河の単結晶と人工結晶とに見られる上のような差異は，この結晶欠陥によるのであろう。

第16図 第15図に示した試料の非対称彎曲。

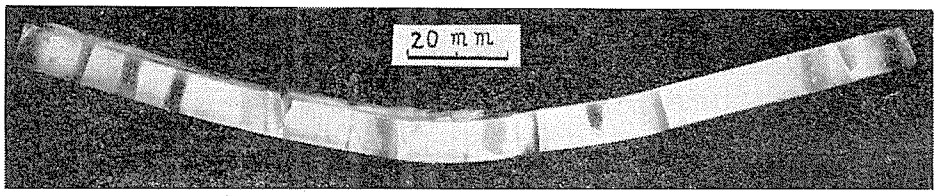
III. 多結晶氷の変形

多結晶氷に荷重を加えると一般に容易に変形するが，外観的に大きく分けると大体2通りの型がある。

その第1型は滑らかに連続的に弯曲する型である。第17図にその例を示す。この場合，



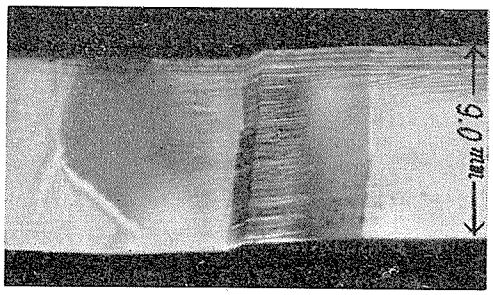
第17図 多結晶氷の彎曲。滑らかに連続的に変形する例。



第18図　多結晶氷の彎曲。彎曲部に不連続面を生じている。

弯曲部の表面には，目につくような変化はほとんど認められない。

第2の型は，弯曲部に不連続面を生じ，表面に段階を生ずる型である。第18図にその例を示す。腐蝕孔を作つて不連続面附近の結晶粒の方位を調べると，C軸が試料の長軸方向に一致していた。従つて辷り面は試料の長軸に垂直になつている（第21図）。金属の多結晶の変形は主として結晶粒界の辷りに基因するとされているが，上の第1の型はこれに相当するものであろう。しかし試料内部に，たまたま隣接する結晶粒に邪魔されないで辷りうる辷り面が存在するときは，そこで辷りを起して不連続的に変形するのである。第2の型はこれに相当するものと考えられる。



第19図　第18図に示した氷の側面の一部拡大。

第20図　第19図に示した部分の一部拡大。

第21図　第20図に示した部分に作つた腐蝕孔。

IV. むすび

今回行つた氷の曲げ試験の結果をまとめると，次のようなことがいえる。

(1) 単結晶氷は辷り面の向きによつて，変形の難易が大きく左右される。

(i) 辷り面が試料の長軸と垂直に交つているばあいは，氷は極めて曲り易い。弯曲部には多数の辷り線が観察された。

(ii) 辷り面が試料の長軸を含む垂直面内にある場合は，氷は極めて変形し難い。大きな荷重をかけて無理に曲げようとすると，試料の上面（圧縮側）の到るところに楔形の「しわ」を生ずる。

(iii) 辷り面が水平な場合は，氷は予想以上に曲りにくかつた。また(i)，(ii)の場合のような外面的の変化は認められなかつた。用いた試料の不均一性にも由ると思われるので，更に良質の単結晶氷を用いて検討する必要がある。

(2) 多結晶氷は，一般に極めて曲り易い。試料を構成している結晶粒の大きさが小さいほど，外観的の変形が滑らかで連続的である。結晶粒が大きくて平均直径1 cmをこえるようになると，第18～20図に示すように不連続的に変形することが多い。

おわりに吉田順五教授をはじめ，雪氷研究グループの方々に終始，御助言，御教示をいただいたことを深く感謝します。また，第2図は当研究所黒岩助教授，第10図(a)は北大理学部六車二郎氏の御好意によつたことを感謝します。

文　献

1) Griggs, D. T. and N. E. Coles 1954 Creep of single crystal of ice. SIPRE Report, ***11***, 1.
2) Higuchi, K. 1957 A new method for recording the grain-structure of ice. J. Glaciology., ***3***, 131.
3) 中谷宇吉郎 1958 氷の単結晶の変形 (1). 金属物理, ***4***, 89.

résumé

Large single crystals of ice (20 cm long, 3–4 cm across) were made by somewhat modified method of D. T. Griggs and N. E. Coles. A rectangular plate of ice cut out from the single crystal was put to bending test by laying it upon two knife edges with a load applied to its center. The directions of the crystal axes were determined by the thermal etching method developed by K. Higuchi and J. Muguruma (1957). If one covers the surface of ice with a thin film of 3% solution of Formvar and leaves it standing cold atmosphere for one or two days, he will see that tiny thermal etch pits have appeared on the surface of ice. Their forms differ according to how the crystallographic axes of ice are positioned in relation to the surface. The uniformity of specimens was examined by the use of polarized light.

(1) The case in which the C-axis of crystal is parallel to the long dimension of the plate—the plate is bent easily in this case (Figs. 4–5). The bend occurs at its center where the load is applied. In the bent part many slip lines are seen on the upper surface of the plate (Figs. 6–7).

(2) The case in which the C-axis of crystal is horizontal and perpendicular to the long dimension of the plate—in this case the slip planes—planes perpendicular to the C-axis of crystal—are so positioned that the bending force has no effect in causing slips across them. The plate cannot be bent with ease. If it is forced to bend by a heavy load, wedge-shaped folds are produced on its upper surface (Figs. 8–9). Thermal etch pits show that a small turn has occurred in the direction of C-axis within the folds (Fig. 10). The more the plate is bent, the more numerous the folds become, the plate coming to be twisted at the same time (Figs. 11–13).

(3) The case in which the slip planes are horizontal. Nakaya who experimented on the natural single crystal developed within a glacier found that the single crystal was easily bent when loaded in such a positions as prescribed here. But the plate of artificial single crystal made by the author can be bent only when a heavy load is applied. The defects of crystal lattice inherent to the artificial single crystal may have caused such a difference.

(4) The case of polycrystalline plate. If the crystal grains are large, the plate is bent at such a point as one where a grain having vertical slip planes is located (Figs. 18–20). Such a situation is ascertained by examining the orientations of grains by the aid of thermal etch pits (Fig. 21). The mechanism of bending in this case is essentially the same as that of the above described case (1). When the crystal grains are small the plate is curved through its whole length (Fig. 17).