



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	雪の結晶の變形 Ⅰ.
Author(s)	吉田, 順五; YOSIDA, Zyungo; 小島, 賢治 他
Citation	低温科學, 5, 75-83
Issue Date	1950-12-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17473">https://hdl.handle.net/2115/17473</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_p75-83.pdf



## 雪の結晶の變形 I.\*

吉田 順五, 小島 賢治

(低溫科學研究所應用物理學部門)  
(昭和23年5月受理)

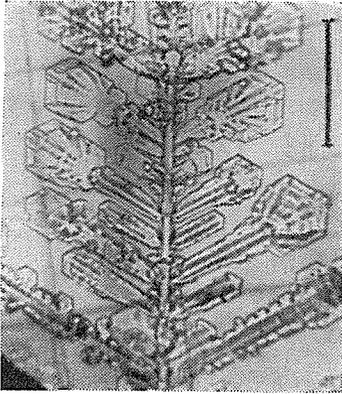
### 1. 樹枝狀結晶の變形

降つたばかりの雪の結晶は細かい構造の骸晶であるが、地上に積るとすぐに變形をはじめ、日射をうけたり暖かい空氣にふれたりして融けなくても、昇華によつて氷のまゝで變形する。この變形のありさまを調べるために低溫實驗室(溫度:  $-20^{\circ}\text{C}$ 前後)の中で、水蒸氣を凝結させて雪の結晶に似た霜の結晶を作り、これをガラスの容器(たてよこ1.5cm 深さ3mm)の中に密閉して顯微鏡で觀察した。結晶を直接ガラスにのせるとガラスにへばりつくようになるので正しい變形がみられない。それで細い針金で1cm角の枠を作り、それに絹の纖維(直徑約 $15\mu$ )をあんで細かい網を張り、その上に結晶のをせるようにした。先ず容器の中に雪の結晶をたくさん入れ、その中央に小さい穴をあけてそこに網をはり調べようとする結晶を網の上ののせて氣密に硝子の蓋をするようにしたのである。調べようとする霜の結晶は四方を雪でとりまかされている。それゆゑ、自然の積雪のなかにある場合とだいたい同じ状態になつていゝと考へてよい。

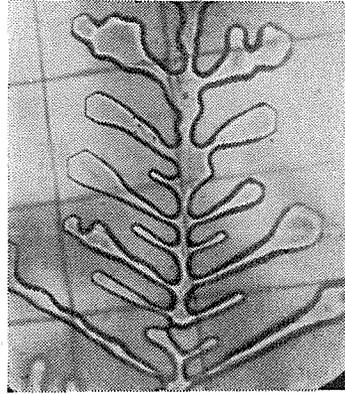
第1圖の寫眞の(a)から(e)まではこのようにして觀察した樹枝狀結晶のひとつの例である。溫度は $-15\sim -20^{\circ}\text{C}$ で、18日ののちには(e)のようにかわつてしまつた。まず、結晶の輪郭はそのままに保たれたまま、細かい凸凹がなくなつてゆく(b)。これがある程度すすむと輪郭もくずれだして圓みをおびるようになり、結晶の形が小さくなる(c)。ついでなお時間がたつと結晶の枝の先の方がふたたび角ばつてきてはじめの結晶(a)と大體おなじ形の輪郭をしめすようになる。ただ形はずつと小さい(d)。そして、なおそのままにしておくと、(e)のように、枝はつけねが細つていつて、ついにそこで切れてしまう。幹もところどころ切れる。

(a)から(e)までに、結晶の幹は、巾がだんだんせばまつてゆき、同時に厚みがまよすうにみえる。しかし、實際に厚みがましているかどうかは、この平面的な寫眞だけでははつきりしない。それで、別の結晶ではあるが、おなじ形の樹枝狀結晶を顯微鏡のしたに、その平面が

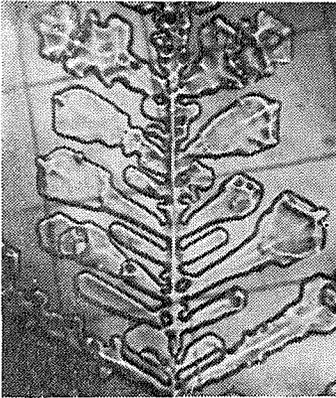
\* 北海道大學低溫科學研究所業績 第99號



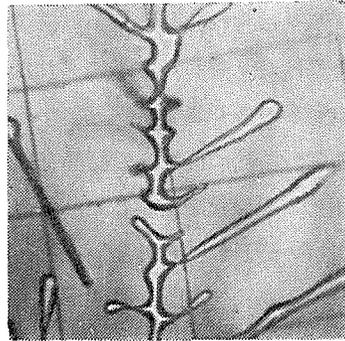
( a ) はじめ



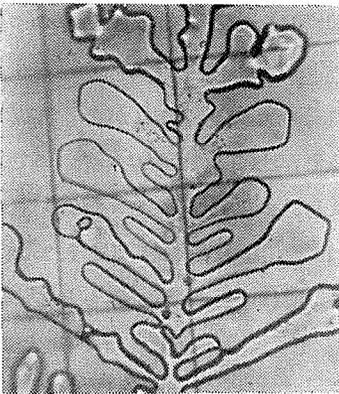
( d ) 4日半



( b ) 15時間



( e ) 18日



( c ) 3日



( f )



( g )

第 1 圖 黒線の長さが 0.5mm

鉛直になるように立て、厚みがみえるようにして観察した。その結果が第1圖の寫眞の(f), (g)である。(f)は、はじめの状態、(g)は(e)とだいたい同じ時間がたつたときの状態である。これで見ると、たしかに結晶の幹は厚さをましていて、(g)では(f)の厚さの3倍から4倍の厚さになつている。また、上からみても横からみても圓みをおびているから、圓い棍棒のような形になつているのに違いない。幹だけでなく、枝もやはり棍棒になつているのであろう。このように、變形がすすむと、樹枝狀結晶の幹や枝は圓筒形になるとともに切れ切れになり、短かい棍棒の集合となる。

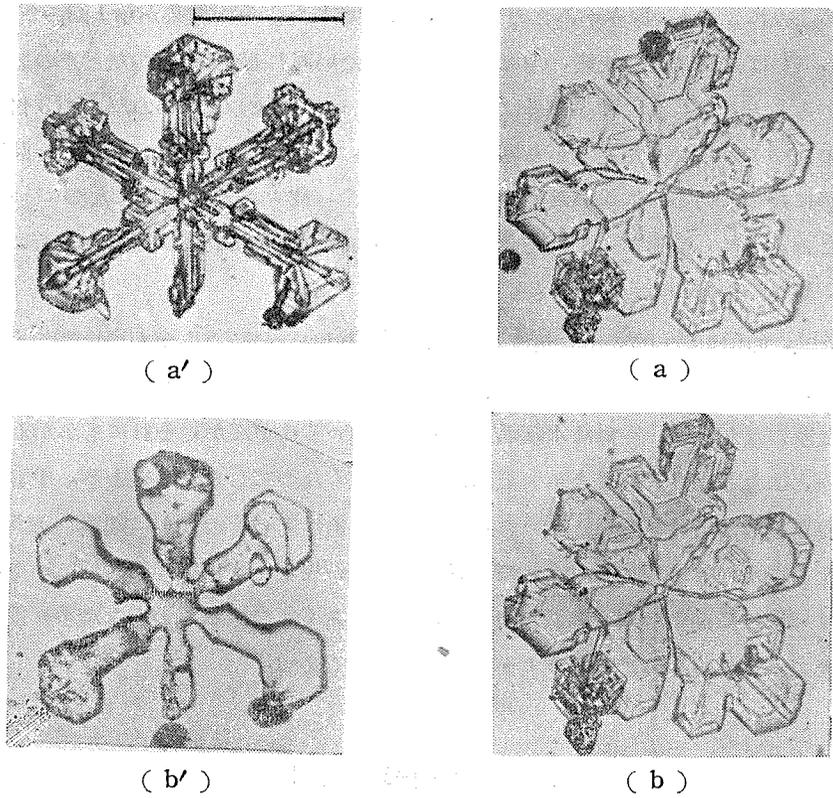
中谷、戸田、丸山は人工的に作つた雪の結晶の昇華をしらべて、うちがわにいちめん霜をつけた硝子瓶のなかに雪の結晶をいれておいても、結晶は變形してしまうことをのべている<sup>(1)</sup>。このような瓶のなかでは、空氣は水蒸氣で飽和されているはずだが、それにもかかわらず前項にのべたとおなじように、こまかい表面の凸凹はなくなつてしまうのである。筆者の観察も、硝子容器に雪の結晶をたくさんいれ、それに孔をあけて、そのなかに観察しようとする霜の結晶をおいたのであるから、うえの中谷ほか二氏の場合と條件は非常に似ている。筆者の場合には、霜の結晶をいつも顯微鏡の視野のなかにおくようにしてあつたため、連続的に観察ができて、變化のくわしいようすがわかつたわけである。

## 2. 結晶の變形の原因

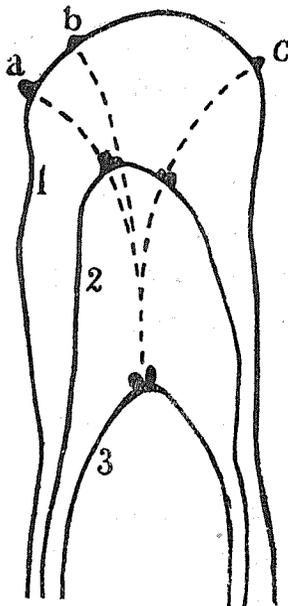
雪の結晶の變形は、結晶の表面のある部分では蒸發がおこり、ある部分には水蒸氣の凝結がおこることによつて起るものと考えられる。しかし、樹枝狀結晶の幹や枝が、しだいに圓くなつてゆくことは、あるいは結晶の表面にそつて分子の移動が行われているのではないかと疑わせる。すなわち、分子が氣體の相を通らずに、固體の相のまゝで移動してゆくのではないかということである。

雪や霜の結晶は、非常にみじかい時間のあいだにできたもので、結晶の格子にはたくさんの欠陥があるにちがいない。したがつて、自由エネルギーが大きいので、自由エネルギーの小さい安定な状態に分子の配列がかわろうとする傾向が大きいはずである。そうすれば固體のまゝでも、分子の移動がはげしくおこつて、その影響が外形の變化にまで現われるかもしれない。この點をしらべる目的で次の實驗を行つた。

降つたばかりの雪の結晶の一つを小さなガラス容器のなかに密閉し、もう一つの結晶をとつて油のなかにつけて低温實驗室のなかにおく。この二つの結晶の變化を顯微鏡で撮影したのが第2圖である。(a),(b)は油のなかの結晶で、(b)は(a)より32日あとのものだが、(a)とすこしもかわらない。(a'),(b')はガラス容器に密閉したもので、數日のうちに(a')から(b')にかわつた。油のなかでは水蒸氣が結晶から蒸發することも結晶に凝結することもできない。したがつて、うえの事實は、結晶の變形はすべて水蒸氣の蒸發、凝結によつておこる



第2圖 黒線の長さが0.5mm



第3圖

ことを示している。

第3圖は、樹枝状結晶の先端部分の顕微鏡寫眞から、輪廓だけを擴大して寫しとつたものである。結晶變形につれて、輪劃の形と位置とは1, 2, 3とかわつていつた。その枝の先には、偶然にa, b, cと印した小さなごみがついていたが、このごみの通つた路筋を圖のように點線で表わすと、結晶の輪廓とはどこでもだいたい直角に交つている。それゆゑ、ごみは、結晶の表面に沿つてうごくことはないわけである。

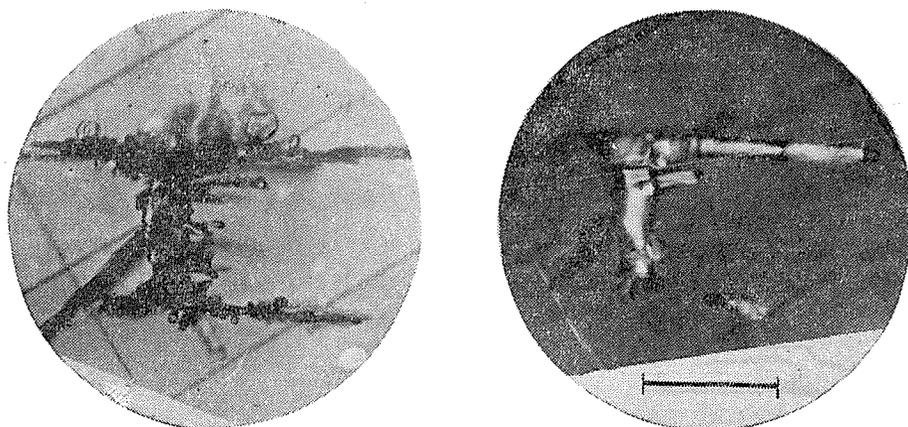
油のなかに浸すと、空氣中にあるときは結晶の表面の状態はかわる。したがつて、空氣中にあるときは結晶の表面を分子が移動するが、油のなかにいれれば移動しなくなるということも考えられる。したがつて、さきにのべたことによつては、表面に沿う分子の移動がないことが、確實に證明されたわけでない。しかし、油の分子と水の分子と

の affinity は小さいから、油のために結晶の表面の状態がそれほど大きく影響されるとは考えられない。それ故分子が表面に沿つては動かないということはほぼ確實と見てよいであろう。なお、もしも、第3圖の結晶についてごみが表面に沿つて動いたのなら、空気中ではたしかに表面にそつて集團的な水の分子の移動があつたことになる。しかし、ごみが表面に沿つてうごかなくても、分子が動かないことの證明にはならない。けれども、ごみが動かないことは、分子もまた動かないということを確からしくする事實と考へてよいであろう。

### 3. 結晶の變形と光軸

氷の結晶は六方晶系に屬して、そのC-軸（このC-軸が六回對稱軸か三回對稱軸かどちらかは、未だにはつきりわかつていない）が光軸である。平面的な六花の雪の結晶の光軸がその面に垂直であることは、はやくから知られている。このことはニコルを直交させた偏光顯微鏡でみると、結晶を水平にしたときは暗く、鉛直にたてたときは明るく色がついて見えることからわかる。

第1節に、平面六花の樹枝狀結晶の變形について述べたが、變形につれて結晶の光軸がどのように變化するかをしらべてみた。その結果、變形しても光軸の方向は變化しないことが確かになつた。樹枝狀結晶を水平において、直交ニコルの偏光顯微鏡でみると、第1節の(e)のように形が變つてしまつてもやはり暗く見える。(e)までの變形の途中でも明るく見えることはない。これに反して、結晶の面を鉛直にして、六花の枝の一本を側面からみるようにすれば、變形がすすんで枝が棍棒狀になつても、やはり明るく色づいて見える。第4圖の



(a) 第4圖 黒線の長さが0.5mm (b)

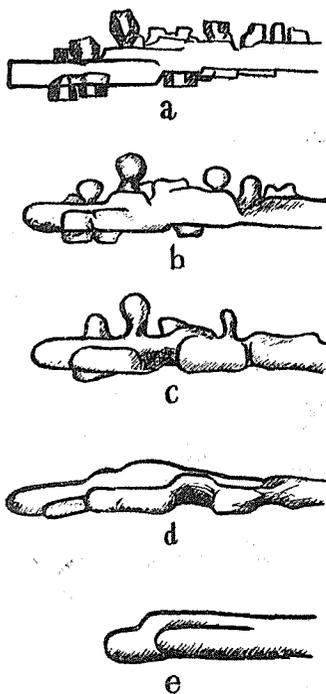
寫眞(a)は2枚の平面樹枝狀結晶が短い氷の棒でつながつて鼓形になつたものを、横から見たものである。したがつて、2枚の樹枝狀結晶の光軸は紙面に平行で、これを直交ニコルのなかにおいてみれば、暗い視野のなかに明るく見える。鼓の柱もやはり明るく見えるから、この部分の光軸もやはり紙面に平行である。(寫眞(a)は偏光を使わないでとつた寫眞であ

る。) 寫眞(b)は、これが變形して棍棒の集合にまで變形したとき、直交=コルを通して見たものである。以上のようにして、雪の結晶の形は非常に變形はするけれども、光軸の方向だけはもとのまに残つてることがわかつた。

#### 4. 雪の結晶の表面についている雲粒の變形

降つてくる雪の結晶の表面には、直徑 $30\mu$ 前後の氷の粒がついていることが多い。これは雪の結晶がおちてくる途中、雲の粒がそこに凍りついたものと考えられる。結晶に凍りついた雲粒の数は場合によつて非常にちがひ、表面にまばらにちらばつてゐる程度から、非常にたくさん群がりついて霰の状態に至るまで、いろいろな階段がある。

ひとつの雲粒が雪の結晶の表面に凍りつくとき、雲粒の結晶の格子が雪の結晶の格子とおなじ方向をもつかどうかの問題である。低温實驗室で水蒸氣を凝結させて樹枝状の霜の結晶をつくり、これに雲粒をつけることができる。これを、第1節でのべたようにして絹の綱にのせて顕微鏡でみると、雲粒がはつきりと六角形をしているのがわかる。結晶の面に沿う方向



第5圖 黒線の長さが $0.1\text{mm}$

にみれば、第5圖(a)に示したように、やや平たい六角柱に見える。雲粒は、雪の結晶に凍りついた當座は、このように結晶形をもつており、またその光軸も雪の結晶の光軸と方向が一致している。それ故、雲粒の結晶粒子は雪の結晶の格子の延長になつてゐると考えられる。

しかし、この雲粒の六角柱の結晶は上からみていると5分ぐらいのうちに圓くなつてしまふ。しかし横からみても圓くなるのは2時間ぐらいかゝり、第4圖(b)は5時間後の形である。

空からふつてくる雪の結晶の雲粒もついたばかりのときもきは、やはり六角柱の形をしていたものであろう。地面にとどくまでには、かなりの時間がかかるので、そのあいだにまるくなつてしまふものと思われる。しかし時には、地面にとどくまで六角柱の形が多少残つてゐることもありうる筈で、實際に、ベントレーの雪の結晶の寫眞集にも、六角形のおもかげを残している雲粒の寫眞をのせて注意をうながしている。

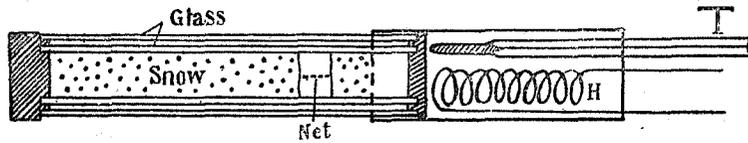
第5圖で(b)のようになつたあと、(c)(d)(e)とかわつてゆく。偏光顯微鏡で調べても、樹枝状結晶の部分にも、雲粒の部分にも光軸の方向に變化はおこつていない。このようにして雪の結晶の表面にまばらについた雲粒は、雪の結晶に融合してしまふのである。

雪の結晶につく雲粒の数が多くなると、直接に結晶の面についたもののほかに、たくさん

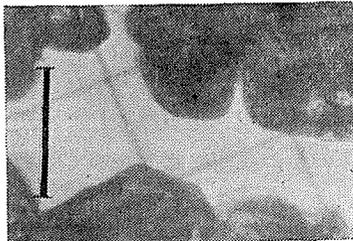
の雪粒が集つて塊となつて、結晶の面にくつつくものもでてくる。これを絹の網に上に乗せて變形させると、直接に結晶についた雲粒は、うゑに述べたのと同じように結晶體に融合する。しかし、雲粒の塊りは結晶體に融合することなく、塊りをたもつたまゝで變形してゆく。そして直交ニコルの偏光顯微鏡でみると、結晶體は暗いのに塊だけは全體が明るく色ずいて、塊の光軸と結晶の光軸との方向が一致していないことを示す。

### 5. 積雪のなかにてきる霜の結晶

積雪は、地面附近では温度が $0^{\circ}\text{C}$ にちかく、表面にちかすくにつれて温度がさがつている。この温度勾配のために、地面近くと表面近くとのあいだに水蒸氣壓力の差がおこり、水蒸



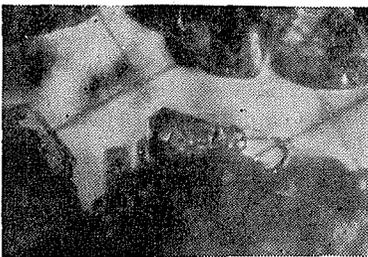
第 6 圖



( a )



( b )



( c )

第 7 圖 黒線の長さが 0.5mm

氣が下から上にむかつて擴散するはずである。しかし普通のばあいには、温度勾配は 1m につき  $2\sim 4^{\circ}\text{C}$  ぐらいであまり大きくない。それで水蒸氣の擴散もそれほど強くはおこらず、積雪のなかの水蒸氣壓は氷の飽和水蒸氣壓に近い。前節までに述べた結晶の變形はみな飽和水蒸氣壓のもとでおこつたものであるから、普通の状態にある積雪のなかにおこる變形にごく近いものを示しているわけである。

しかし、實際の積雪のなかにも、場合によつては非常に大きな温度勾配がおこり、水蒸氣の擴散がはげしくなることもある。このようなときには、積雪の粒子の表面に六角板や六角のコツプの形をした霜があらわれ Depth Hoar といわれる。Depth Hoar の成長する過程をみるためにつぎのような實驗をした。

第 6 圖は、内容積  $6.5\text{cm}\times 2\text{cm}\times 0.45\text{cm}$  の平たい箱の側面圖である。上下の面は熱の移動をふせぐため、二重のガラス板ではつてある。この箱に雪をつめ雪のなかに小さい穴をあけて絹の網をはり、その上に雪の粒(しまり雪の粒)をばらまいた。低温實驗室のなかで、箱の一方の端を電熱線 H であたためると、雪

のなかに  $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  の程度の温度勾配が水平方向にあらわれ、網の上の粒の表面に霜があらわれる。第7圖がそれをうつした顕微鏡寫眞で、寫眞では上の方が温度が高く、下の方が低い。(a) がはじめの状態で、(b) (c) と變化する。温度の高い上の方にある雪の粒は蒸發して、その下がわの面が上の方に移つてゆく。そして温度の低い下の方の雪の粒の上がわの面には霜の結晶が成長してくる。この霜の結晶は、この寫眞では六角板であるが、六角のコツプ形になることもあり、實際の積雪のなかに見られる Depth Hoar と全くおなじ形をしている。

うえに、積雪のなかでは、下の方の温度の高いところから、上の方の温度の低い部分に水蒸氣が擴散してゆくといつたが、この擴散にはふたつの形が考えられる。第1は、下の方で蒸發した水蒸氣が、雪の粒のあいだの隙間をとおつて上の方へ擴散する形である。第2は、温度勾配の方向にあいついでならんだ雪の粒のあいだの隙間で、温度の高い側の粒の表面で水蒸氣が蒸發して擴散し、温度の低い側の粒の面に凝結する形である。このような蒸發、擴散、凝結が、温度勾配の方向にならんだすべての雪の粒の間の隙間におこれば、水蒸氣はやはり温度の高いところから低のところへ移動することになる。實際の積雪のなかでは、第1、第2兩方の形の擴散が同時に起つているのであろうが、第7圖に現われたところから判斷すると、第2の形の擴散の方が強くおこつているものと考えられる。第7圖で、上の方の雪の粒の表面がひき退き、下の雪の表面に霜が成長したのは、明かに上の粒から蒸發した水蒸氣が、上下の粒のあいだの隙間を下の方にむかつて擴散し、下の粒の表面に霜となつて凝結したことを示している。

### 摘 要

水蒸氣で飽和した空気中でおこる雪の結晶の變形の過程を顕微鏡で觀察した。樹枝狀結晶は、短い氷の棍棒の集合にかわる。また變形がおこつても、結晶の光軸の方向に變化はないことを偏光顕微鏡による觀察でたしかめた。結晶を油のなかにいれておけば全然變形しないことをたしかめ、變形はすべて水蒸氣の蒸發、凝結によつておこることが知られた。なお雪の結晶の表面についている雪粒の變形、温度勾配のなかでおこる雪の粒の變形についても觀察した。

この研究は文部省科學研究費によつて行つたものである。

### 文 献

- (1) U. Nakaya, Y. Toda and S. Maruyama 1938 Further Experiments on the Artificial Production of Snow Crystals. Journ. Fac. Sci, Hokkaido Univ. (Physics) 2. 54.
- (2) U. Nakaya and K. Hasikura 1934 Classification and Explanation of Snow Crystals observed in the Winter of 1933-34 at Mt. Tokati and at Sapporo. Journ. Fac. Sci. Hokkaido Univ. (Physics) 1, p. 169 and photographic plates VIII, IX.
- (3) U. Nakaya and T. Terada: 1935 Simultaneous Observation of the Mass, Falling Velocity and Form of Individual Snow Crystals. Journ. Fac. Sci. Hokkaido Univ. (Physics) 1. 199.
- (4) Bentley and Humphreys 1931 Snow Crystals.

**Résumé.**

Snow crystals were observed by a microscope as they changed slowly their shapes in atmosphere saturated with water vapour. A crystal of dendritic type became an assemblage of short ice rods. Optic axis of a crystal retained its original direction in spite of great change in shape of the crystal. A snow crystal dipped in an oil layer did not change its shape at all. This fact shows that any change in the shape of a snow crystal is due to evaporation or condensation of water vapour. Process of change in shape of snow crystals subjected to a temperature gradient and that of cloud particles attached to a snow crystal were observed microscopically.