



Title	雪の結晶の變形 Ⅱ. : 結晶の種類と温度による變形の差異
Author(s)	小島, 賢治; KOZIMA, Kenzi
Citation	低温科学, 9, 187-203
Issue Date	1952-12-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17535">https://hdl.handle.net/2115/17535</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	9_p187-203.pdf



## 雪の結晶の變形 II.

(結晶の種類と温度による變形の差異)\*

小 島 賢 治

(低温科学研究所 応用物理学部門)

(昭和 27 年 9 月 受理)

### I. ま え が き

前に発表した第 1 報 雪の結晶の變形 (I)<sup>1)</sup> では、人工的に作つた霜の樹枝状結晶の一部が、 $-20^{\circ}\text{C}$  で 18 日間にわたつて變形する過程を顯微鏡寫眞について説明した。併し、實際の積雪ではこのような低い温度が続くことはなく、又結晶の種類によつても變形の様子が異なる筈である。そこで、数種類の結晶について、それらが  $0^{\circ}\text{C}$  以下のいろいろな温度で變形するありさまを顯微鏡で觀察した結果をここに報告する。

變形を觀察する方法は第 1 報で述べたのと同じである。結晶が直接ガラスと接觸することをさけるため、細い針金で作つた 1cm 四方の枠に絹の維織の網を張つてそれに結晶をのせ、そのまわりを別のたくさん雪の結晶でとりかこむ。この全体を小さいガラスの容器に密閉したまま低温實驗室においた。低温實驗室の温度はだいたい一定しているので、温度をかえるためには恒温箱を使った。結晶を入れた容器を恒温箱に入れておいて、数日おきに取り出しては寫眞に撮つた。注意すべきことは、結晶を入れた容器をそのまま放置すると、恒温箱の中に出来る少しばかりの上下方向の温度差のために、容器内にも僅かではあるが上下に温度差が出来て、そのため結晶の變形も影響を受けることが認められることである。そこで、容器を更に厚さ 1mm の真鍮板で作つた箱に收めて、容器の内部が一様な温度になるように注意した。

### II. 樹枝状結晶一箇の變形

整つた形の樹枝状結晶一箇の變形は第 1 報でくわしく述べたように、先ず結晶の表面に見られるこまかい構造が消えて、結晶の各部分がまるみを帯びてくる。薄い板状の形が次第に切口のまるい棒のようになるに従つて、小さい枝は幹に融合し、大きい枝はつけ根の細い所から切れるよ

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第 171 号

うになる。10日程経つと幹も所々で切れて、最後には多くの短い棒にわかれてしまう。前にはこのような変形の途中で、まるみを帯びた結晶の端の部分に再び結晶面があらわれることを観察したが、結晶を入れた容器を眞鍮の箱に収めて容器内の温度が一様になるようにし、しかも温度を常に一定に保つておくと、まるみを帯びた部分に再び結晶面があらわれるということは起らなかつた。写真1は樹枝状結晶が $-7^{\circ}\text{C}$ で変形する経過を顕微鏡写真に撮した一例である。この項で述べたことは、絹の網の上にただひとつ載せられた結晶についてのことである。網の上に多数の結晶をのせ、結晶同志が接觸するようにしておくと、その影響がいろいろな形であらわれ、結晶の部分部分の位置が移動するというようなことも起り得る。次の項はそのような場合を取扱う。

### III. 多数の雲粒に被われた樹枝状結晶の変形

札幌地方では、樹枝状結晶が降るとしても、写真1に示したようなきれいな結晶が厚い層をなして積ることは稀で、結晶の表面には多数の雲粒がついていることの方が多い。写真2はこの種の結晶を多数網の上におき、結晶同志が互に接觸するようにした場合の変形の経過である。(A)は $-15^{\circ}\text{C}$ での変形で、(B)ははじめの7日間を $-5^{\circ}\text{C}\sim-6^{\circ}\text{C}$ 、それから29日目までを $-0.1^{\circ}\text{C}$ におき、それ以後は再び $-5^{\circ}\text{C}\sim-6^{\circ}\text{C}$ に移した場合の変形である。第1報でも既に、母体の樹枝状結晶に直接ついた雲粒は数日間の中に結晶の面に融合するようにして見えなくなるか、または、雲粒同志多数重つてついている所はそれらが一塊に結合して大きな粒を作ること述べた。写真2でも同じことが見られる。一方母体の結晶自身は、前項に述べたような雲粒をつけない樹枝状結晶と同じ経過をたどつて変形する。従つて、雲粒が見えなくなつてからは、始めから雲粒がない樹枝状結晶の変形と殆ど変りない。ただ雲粒同志が集つて出来た大きい粒(主に枝の端に近く出来る)が樹枝状結晶の一部に結合して、その部分がふくらみを持つた形になることが多い。

(A)と(B)とを較べてみると、雲粒の消え方も温度の高いBの方が速いし、母体の結晶も(A)では10日程経つても切れた枝は1本もないのに、(B)では5日目既に枝が切れている。また、5日目から10日目までの間に、斜左上の方に伸びた枝の根元が、少し上の方に移動して、そこで、上方に伸びる枝に結合するというようなことも起つている。この枝の先端はとなりの結晶の1本の枝と接觸して一体となつているが、この一体の重心の位置が変わり、このような移動をおこしたのであろう。隣りの結晶と接觸していない全く独立した結晶についての写真1の変形では、このようなことは見られず、変形した最後の形は単調な棒状あるいは球状の粒であつた。しかし実際の雪では多くの結晶が互に接觸しているから、枝が切れて小さい部分に別れる変化と同時に、接觸部分がつながつて大きい粒になる変形もさかに行われる筈である。写真2(B)ではこのような変化の一つの場合が見られたわけである。

### IV. 樹枝状結晶の集合の変形

結晶密集度を更に高めて、実際の積雪の状態に近づけて観察したのが写真4である。

前項までのと同じ容器の網の上に、樹枝状結晶を互に重なり合う程度にたくさん不規則においた。(A)は $-20^{\circ}\text{C}$ 、(B)は $-7^{\circ}\text{C}$ での変形である。これらの二組の寫眞をくらべてみると、変形の速さが温度によつて異なるだけでなく、温度が違つると異つた形に変形して行くことがわかる。温度が高い場合には、切れてはなればなれになつた結晶の部分同志の結合が盛に行われ、結合した後は次第にまるい粒になり易い。これに反して $-20^{\circ}\text{C}$ では、六花の形をいつまでも保つている結晶がたくさんあり、樹枝状の枝は細長い形のままで互に他の結晶の枝とつながつている。實際に平地では $-20^{\circ}\text{C}$ の気温が続くことはないから、50日も経つて(A)-(f)のような形をしている雪は見られない。(B)-(f)のような粒が全部互につながりあつたのが、普通積雪の中に見られるしまり雪の構造である。以上のようにして、温度と結晶の集合状態を實際の積雪に近づけておいて変形をしらべた結果、積雪の中によく見られるようなしまり雪の粒子構造が出来た経過が観察出来たわけである。

#### IV. 霰の變形

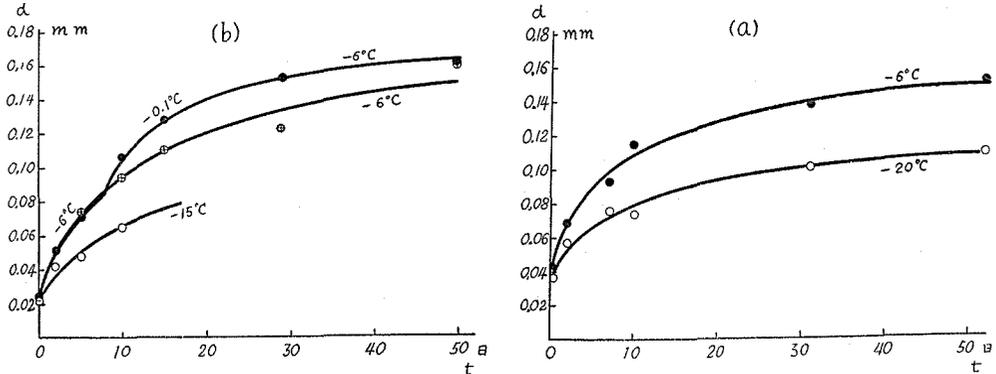
札幌地方では、霰が厚い層をなして降り積ることが非常に多く、しまり雪の層の1/3くらいは霰から変形したもので占められている。

従つて霰の変形を調べることは、實際の積雪の粒子構造の変化を知る上に是非必要なので樹枝状結晶の場合と同じ方法で霰の変形を観察した。

霰は立体樹枝状結晶の周囲に雲粒が多数ついて全体まるい形になつたものか、平板六花の片方の側に厚く雲粒がついて円錐に似た形をして落ちてくるもので、霰は密に多数集つた雲粒とも云える。雲粒の大きさは直徑20 $\mu$ 前後のものが多いが、まずこれらが隣同志数箇所互に結合して行く。それと同時に結合によつて出来る凸凹がなくなるように変形するので、次第に大きな球状或は円筒状の粒を作るようになる。寫眞4のAとBとは、同時に降つた霰の変形で、Aは $-15^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、Bは降つてから7日目から29日目までは $-0.1^{\circ}\text{C}$ 、その前後は $-5.0^{\circ}\text{C}\sim -6.0^{\circ}\text{C}$ においたものである。これらの寫眞から明らかなように変形が進んで粒が大きくなると云つても、霰全体が一塊の氷の粒になることはなく、はじめのこまかい隙間も次第に大きくなつて、結局霰は幾つかの大きい粒が互につながり合つた構造にかわる。實際の積雪では寫眞(a)のような霰がつみ重つた状態から、(g)のような粒が上下左右につながり合つた構造に変化するわけである。樹枝状結晶と霰とではその形が互に反對の極端にあると云つてもよい程ちがつているにもかかわらず、樹枝状結晶の集合が変形を始めてから50日後の寫眞3Bの(f)と変形した霰の寫眞4の(g)とをくらべると非常によく似ている。實際の積雪では20日以上も経つたしまり雪になると、降つたときの結晶形は殆ど区別がつかなくなるのであるが、その変形はこのようにして行われるのである。

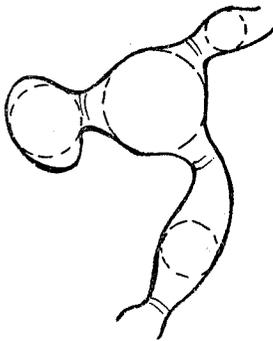
第1図は霰が変形するとき、霰を作つている粒の大きさの時間的变化を測定した結果を图示した

ものである。粒の大きさをあらわすには、一つの粒とみなされる部分に第2図のように内接円を書いて、その直径を数十箇の粒について平均したものを、その霞を作っている粒の平均の大きさとした。変形が進むとともに、上のべたように最初の粒はいくつか結合して大きな粒となり、その



第 1 圖

結合して出来た粒の形は球から外れてくるので、便宜上このような内接円の半径をもつて粒の半径としたわけである。實物の50倍に引伸した寫眞について、1mm以下4捨5入で直径を測つた。

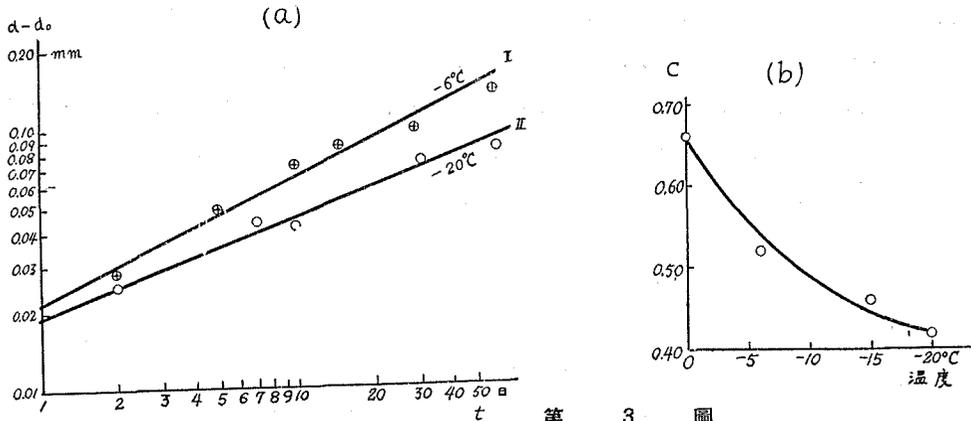


第 2 圖

第1図(a)及び(b)の縦軸はmmであらわした雪粒の直径で、横軸tは降つてからの経過日数である。はじめの粒の平均の大きさを $b_0$ mm、t日後の粒の平均の大きさをdmmとすると、第3図(a)に示すように $d-d_0$ の対数はtの対数に大体比例する。つまりdとtとの関係は、

$$d = d_0 + At^C \quad \dots\dots (1)$$

であらわされる。AとCとはtに関しては常数であるが温度の函数である。温度が $0^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$



第 3 圖

の範囲では、 $A = 0.035 \sim 0.055$ 、 $C = 0.40 \sim 0.70 \text{ mm}$  という範囲の値をとり、 $d_0$  は  $0.02 \sim 0.03 \text{ mm}$  が普通である。C と温度との関係は第 3 図 (d) に示した。例えば、第 3 図 (a) の直線 I では、

$$d = 0.02 + 0.04t^{0.52} \quad \dots (2)$$

である。齋藤練<sup>2)</sup> は積雪の中から取り出した粒の平均の大きさの測定から

$$d = 0.80 - 0.83 e^{-0.039t} \quad \dots (3)$$

とした。この式は雪粒の大きさが平均  $0.80 \text{ mm}$  に指数函数的に近づくことを示しており、これから求められる  $d$  は同じ  $t$  の値に対して (2) 式から求められる  $d$  より非常に大きい。実際の積雪でこのように粒が大きくなることのひとつの原因は、舊雪になる程上に積つた雪の圧力で雪粒が密につき、粒同志の結合が盛に行われることである。

## VI. 針状結晶の集合の変形

針状結晶はごく稀にしか降らないので、積雪の粒子としては、余り重要ではないが新しい結晶は特殊な形をしているので、その変形も一応観察した。写真 5 は針状結晶の集合が  $-8^\circ\text{C}$  で変形する有様を撮したものである。はじめ平行に接觸している結晶は、雲粒の結合と同じように結合して一本の太い棒状に変形する。こまかい凸凹がならされて、大きくまるい粒や円筒状の粒がつながつた形になるのは他の結晶の場合と同じで、20日ほど経つと写真 5 (c) で見られるように、樹枝状結晶が変形したものとよく似てくるのである。ただ、この写真で見ると、結晶全体の体積が変形とともに増大している。しかも、9日後では変形した結晶の端の部分が結晶形を示している。實は、10日目までは結晶を入れた容器を眞鍮の箱に収めずにそのまま恒温箱に入れてあつたので、底の電熱器からの輻射で結晶を入れた容器の内部にも上下に温度差が出来、容器の上部にあつたこれらの結晶に底部におかれた雪粒から蒸発した水蒸気が凝結して結晶面を作つたばかりでなく、結晶全体に凝結が起つてその体積が増したものと考えられる。10日目に金属の箱に収めて容器の内部を一様な温度にした所、18日後の (c) でみられるように端の部分の結晶面は消えてまるい形になつた。

この實驗では不注意のために、結晶がその周囲の温度勾配の影響を受けながら変形するところを観察したのであるが、積雪の中には殆ど常に上下の方向に温度の差があるから、むしろその意味では實際の積雪に近い条件で変形をしらべたとも言えるわけである。

## VII. その他の結晶

角板、角柱或はそれに近い結晶は一つだけ切りはなして観察すると、変形が進んでも全体の輪郭が甚だしい変化をしない。枝の付根の細くない広幅六花なども同様である。勿論、これらの種類の結晶も角がとれてまるみを帯びた形に変形する点は他の結晶の場合と同じであるから、多数

の結晶を集合状態にしておくと互に接点でつながりあつて行き、終には他の種類の結晶から変形したものと非常に似た形になる。ここに挙げた例のように過飽和度が比較的小さい状態でゆっくり生長した結晶は、はじめから、粒子状或は棒状に近い形をしているので、積雪の中で甚だしい変形をしないですむのであると考えられる。

### VIII. 二つの雪粒の接点の変形

以上述べた雪の結晶の変形は、結晶の尖つた部分とか細い部分が特に速く蒸発して、平面或は凹んだ部分には凝結が起ると云う原則に従つて行われている。例えば二つの球状の水が接觸している場合には、その接点で盛に凝結が起るのでこの二つの氷粒はつながり、この粒が適当に小さい場合は、しまい一つの球状の氷になつてしまう。写真6(A)は表面を蒸発させてまるい形にした雪粒を二つ、変形を調べる容器の底のガラス面上に並べて接觸させたのち、ガラスで密に蓋をしてそのまま0°C以下の所においた場合、接点に凝結が起つてつながるところを顕微鏡寫眞に撮したものである。大きい倍率のレンズを用いると接觸後30分位でも接觸点が氷でつながっているのはつきり認めることが出来る。

(B)は外見上は接觸させたつもりでも、實は完全についていなかった場合の例である。このように、少しでもはなれていると、接近している兩方の粒の面の間に凝結が起らないで、却つてますますはなれることがあるわけである。

### IX. 要 約

雲粒付樹枝状結晶、樹枝状結晶の集合とそれに霰の三種類の結晶の昇華による変形の過程をしらべ、各々の場合について0°C~ -5°Cと -15°C~ -20°Cでの変形の速さを比較した。樹枝状結晶の集合はでは、-20°Cでは、50日後にも未だ星状の輪郭を保っている結晶をふくみ、全体細長い棒状或はひも状の結晶がつながりあつた構造になる。-6°C附近の温度では、50日後にはもはや元の形がうかがわれる結晶は殆どなく、枝が切れてまるみを帯びたものと、結晶同志が結合して球状になつたものが互につながつた構造にかわる。この他いろいろな種類の結晶について、同じ様な方法で変形の過程を観察したが、温度が0°C~ -5°Cの程度であると、始めの結晶形に拘らず約一ヶ月経つと殆ど同じ大さと形の粒になつた。温度が-20°Cの附近ではなかなか元の結晶形の影響を失わない。雲粒のように非常に小さい粒は次第に結合して大きい粒を作るが、霰を作っている雲粒の平均の大きさの変化を測定して次の式を得た。はじめの雲粒の平均の大きさを、 $d_0$ mm降つてからt日後の粒の平均の大きさをd mmとするとdは、 $d = d_0 + At^C$ であらわされる。A及びCはtに関しては常数であつて温度で変る。その値は0°Cから-20°Cの間では、 $A = 0.035 \sim 0.055, C = 0.40 \sim 0.70$ の範囲にあることを確めた。但しこれらは、霰一箇を他からはなして変形

させた場合であり而も結晶の周囲の温度は一樣になるように注意した場合である。實際の積雪粒子の大きさの変化は温度と経過日数の他に温度勾配、上に積つた雪の重さなどが影響するものと思われる。又、前の報告で、樹枝状結晶の変形の途中一度まるくなつた部分に再び結晶形があらはれると述べたのは、實は結晶の周囲に温度勾配があつたため、周囲の温度を一樣にしておくことのようなことは起らないということを確認した。

最後に、この研究に對して終始いろいろと御指導を頂いた吉田教授に厚く感謝の意を表する次第である。

#### 文 献

- 1) 吉田順五, 小島賢治 1950 雪の結晶の変形 (I) 低温科学, 5, 75.
- 2) Saito R. 1949 Physics of Fallen Snow. 中央氣象台歐文彙報, 19, 1~2号

#### R é s u m é

Several kinds of snow crystals were observed by a microscope as they changed slowly their shapes in an atmosphere saturated with water vapour at different temperatures below 0°C. Many researchers have made experiments on this subject but their methods of observation have had a defect in that snow crystals to be observed were put directly on the object glass of a microscope. The crystals put on the glass clung to it and the natural mode of change in the crystal shape was disturbed. In order to avoid this experimental defect the present author put the snow crystals on a net woven with single silk fibers which was stretched in a hole made in a small cubic block of snow. The block of snow was placed in an air tight glass box which was placed in its turn in a box made of thick copper plates. The copper box was necessarily used to keep the temperature in the glass box uniform.

An isolated snow crystal of dendritic type changed its shape as shown in six photographs of Pl. I. It became an assemblage of short ice rods in 36 days after being kept at the temperature of -7°C. Photos. of group A in Pl. II show the case of a dendritic crystal which was covered with many small ice particles. Photos. of group B of the same Pl. show the mode of shape change of a snow crystal which was placed on the silk net together with other crystals in such a way that they touched scarcely each other at their branch ends. While each crystal split into many short ice rods, these ice rods united themselves into thick rods or spheroids. Some of the united rods even moved themselves as a whole due to the displacement of their centre of gravity caused by the shape change. Snow crystals placed more densely on the silk net changed their shapes

as shown in Pl. III. Photos. of group A show the case of low temperature of  $-15^{\circ}\text{C}\sim -20^{\circ}\text{C}$  and those of group B the case of moderate temperature of  $-6^{\circ}\text{C}\sim -7^{\circ}\text{C}$ . In the latter case the crystals had changed in 51 days into gravel-like forms which the ice particles of old snow cover show. Graupel is an assemblage of a large number of small ice particles and it changed its shape as shown in Pl. IV. The small ice particles united themselves gradually into large ice particles and after 49 days their appearance could not be distinguished from those of the gravel-like particles found in old snow cover. The snow crystals of needle type also became gravel-like as shown in Pl. V.

The left column of Pl. VI shows how the contact between two ice particles is bridged. The right column shows the case in which the bridge was not formed because of the imperfection of the original contact.

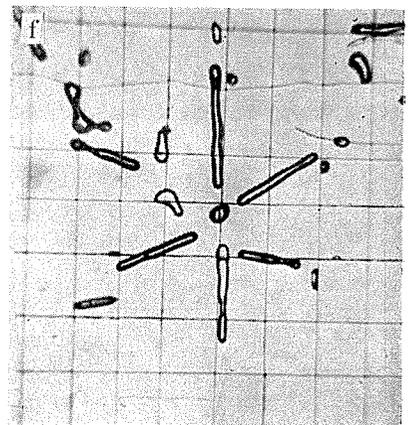
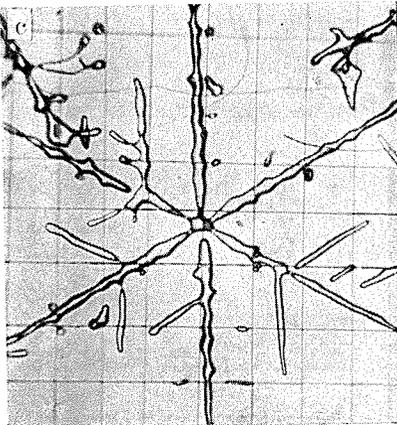
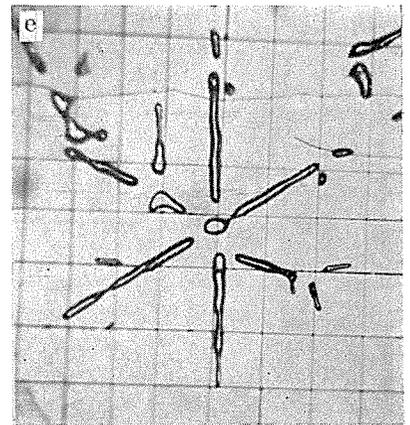
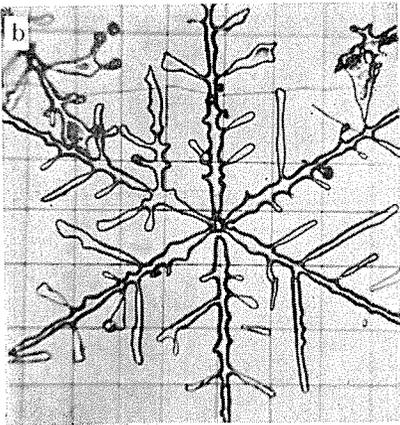
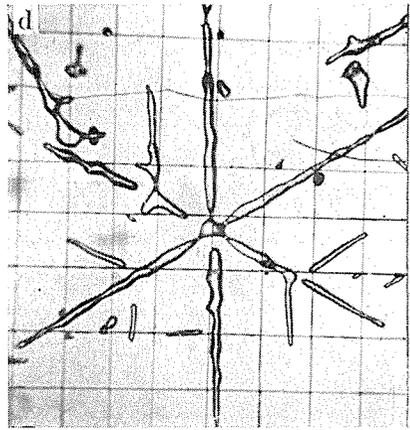
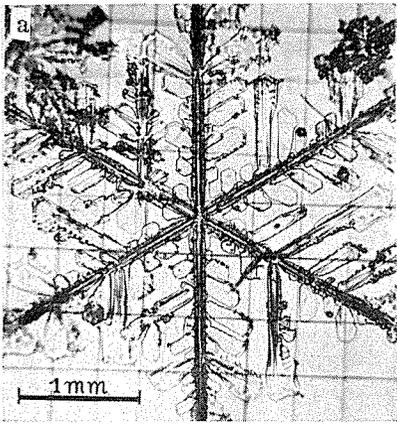


写真1. 樹枝状結晶一箇の変形 ( $-7^{\circ}\text{C}$ )

a)はじめ b) 5日後 c) 10日後 d) 15日後 e) 31日後 f) 36日後

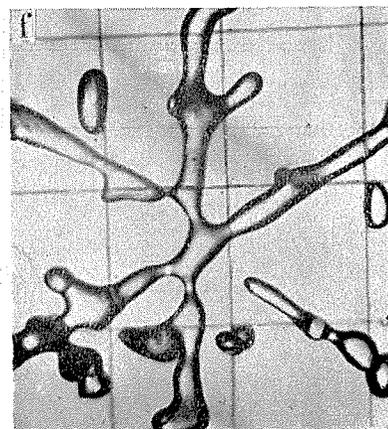
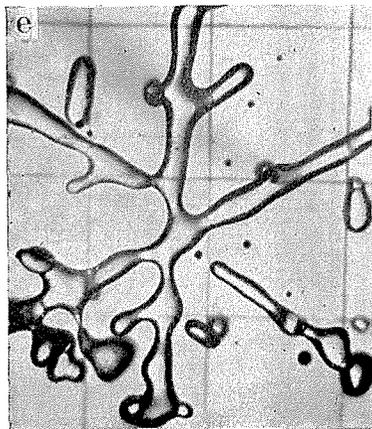
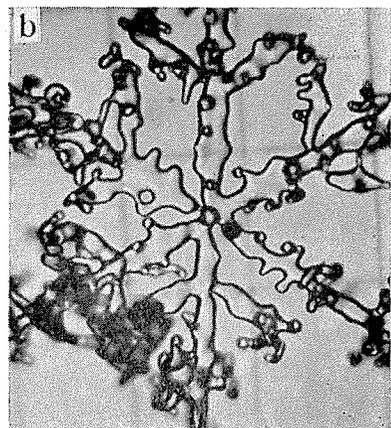
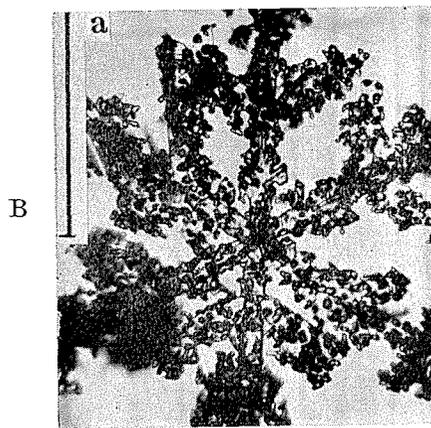
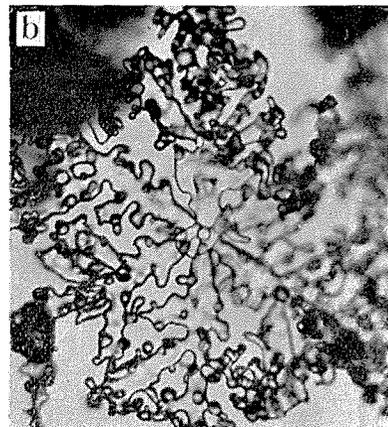
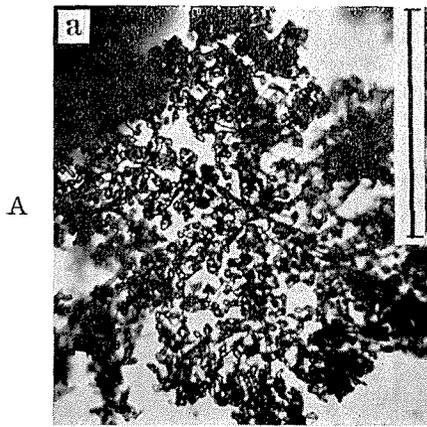


写真2. 雲粒が多数ついた樹枝状結晶の変形  
(黒線の長さは1mm)

A:  $-15^{\circ}\text{C}$

a) はじめ b) 2 日後 c) 5 日後 d) 10 日後

B:  $\left\{ \begin{array}{l} 7 \text{ 日後迄 } -6^{\circ}\text{C}, \\ 7 \text{ 日後} \sim 28 \text{ 日後 } -0.1^{\circ}\text{C}, 28 \text{ 日後以後 } -6^{\circ}\text{C}, \end{array} \right.$

a) はじめ b) 2 日後 c) 5 日後 d) 10 日後 e) 15 日後  
f) 21 日後 g) 28 日後 h) 49 日後

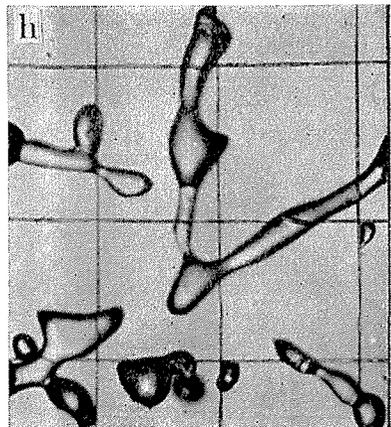
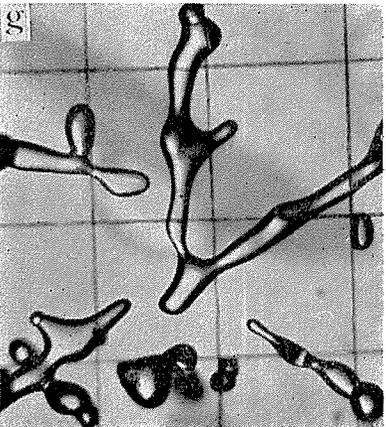
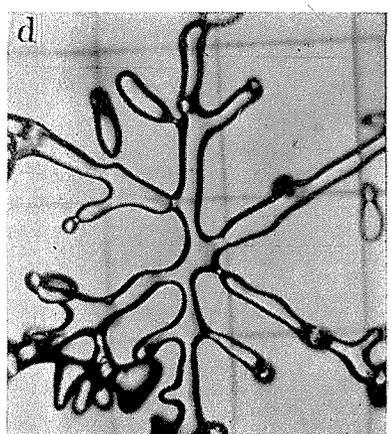
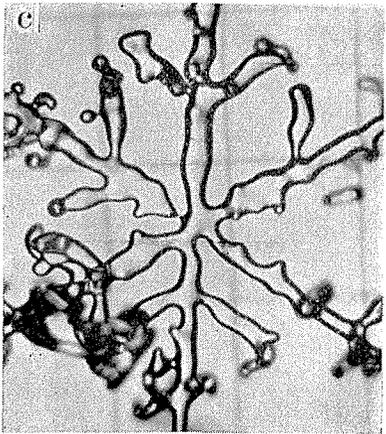
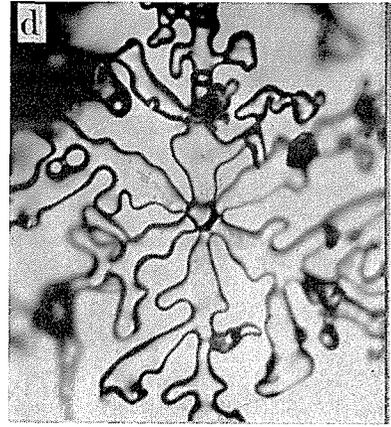
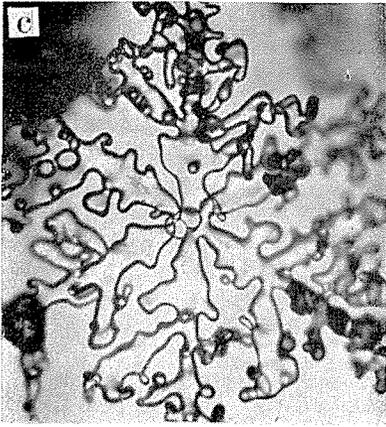
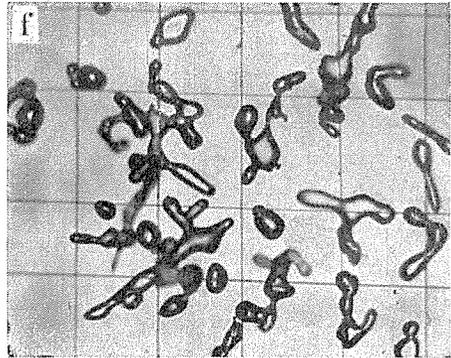
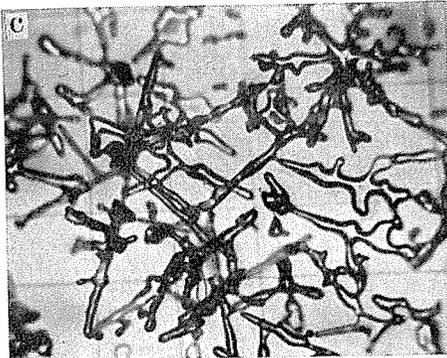
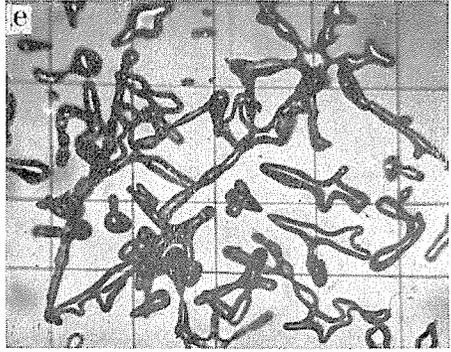
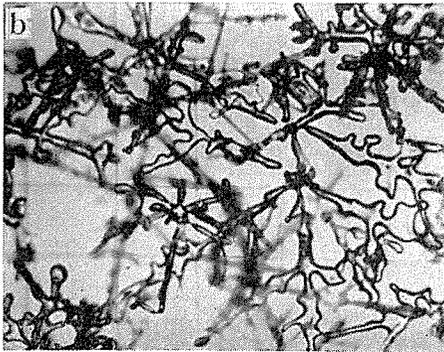
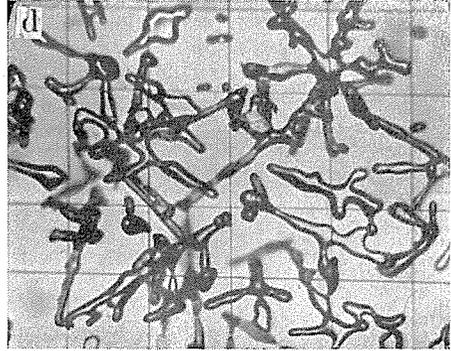
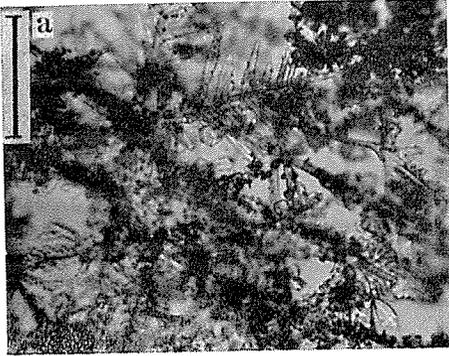




写真3. 樹枝状結晶の集合の変形 (黒線の長さは1mm)

$\Delta$ :  $-15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$

a) 1時間後 b) 4日後 c) 10日後  
d) 15日後 e) 30日後 f) 51日後



B:  $-6^{\circ}\sim 7^{\circ}\text{C}$

a) 1時間後    d) 4日後    c) 10日後  
d) 15日後    e) 30日後    f) 51日後

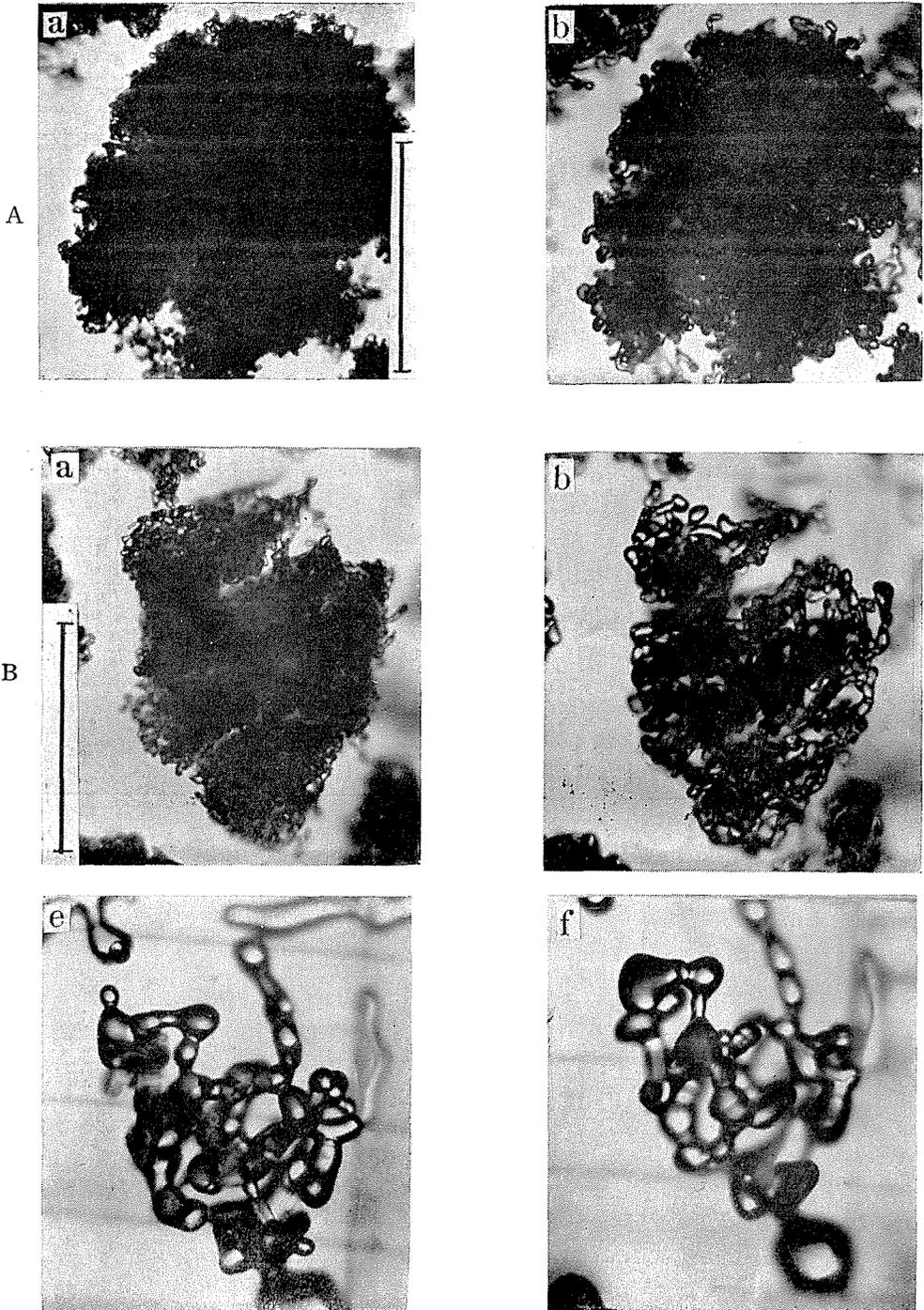
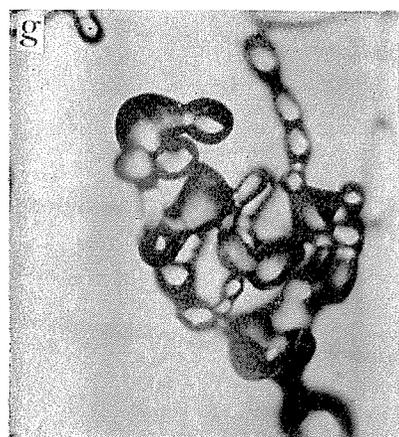
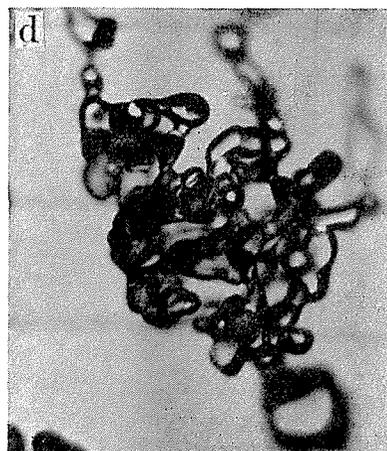
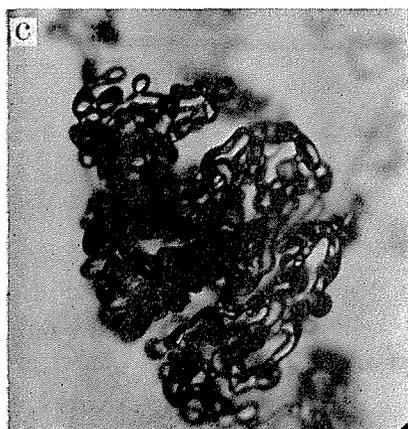
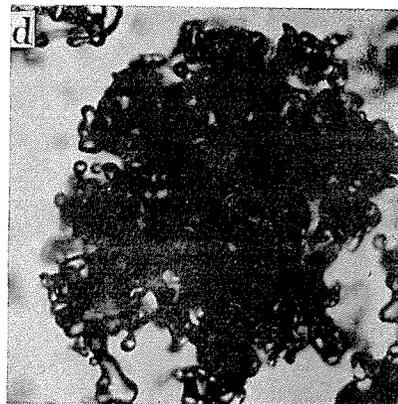
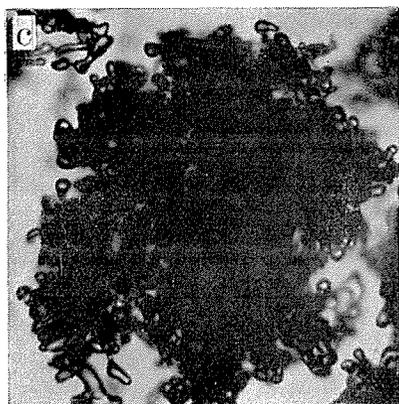


写真4. 霰の変形 (黒線の長さは1mm)

A:  $-15^{\circ}\text{C}$

a) はじめ b) 2日後, c) 5日後 d) 10日後



B: { 始め～7日後  $-6^{\circ}\text{C}$   
 7日後～28日後  $-0.1^{\circ}\text{C}$   
 29日後～49日後  $-6^{\circ}\text{C}$

a) 始め b) 2日後 c) 5日後 d) 10日後 e) 15日後 f) 28日後 g) 49日後

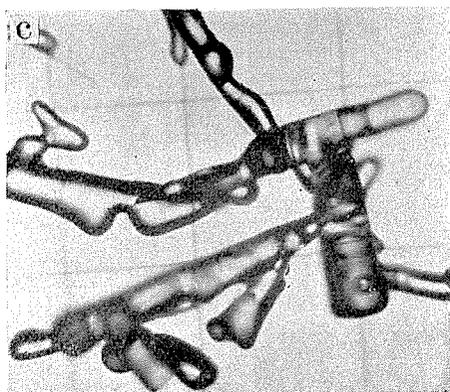
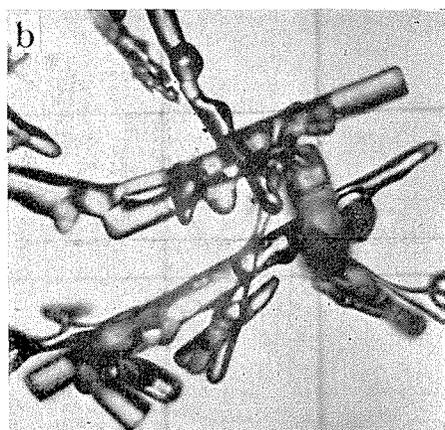
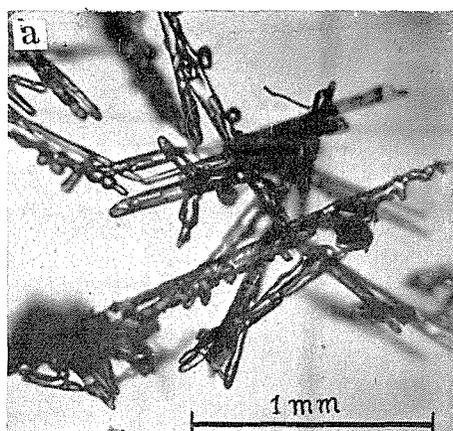


写真5. 針状結晶の集合の変形 ( $-8^{\circ}\text{C}$ )  
a) 1日後 b) 9日後 c) 18日後

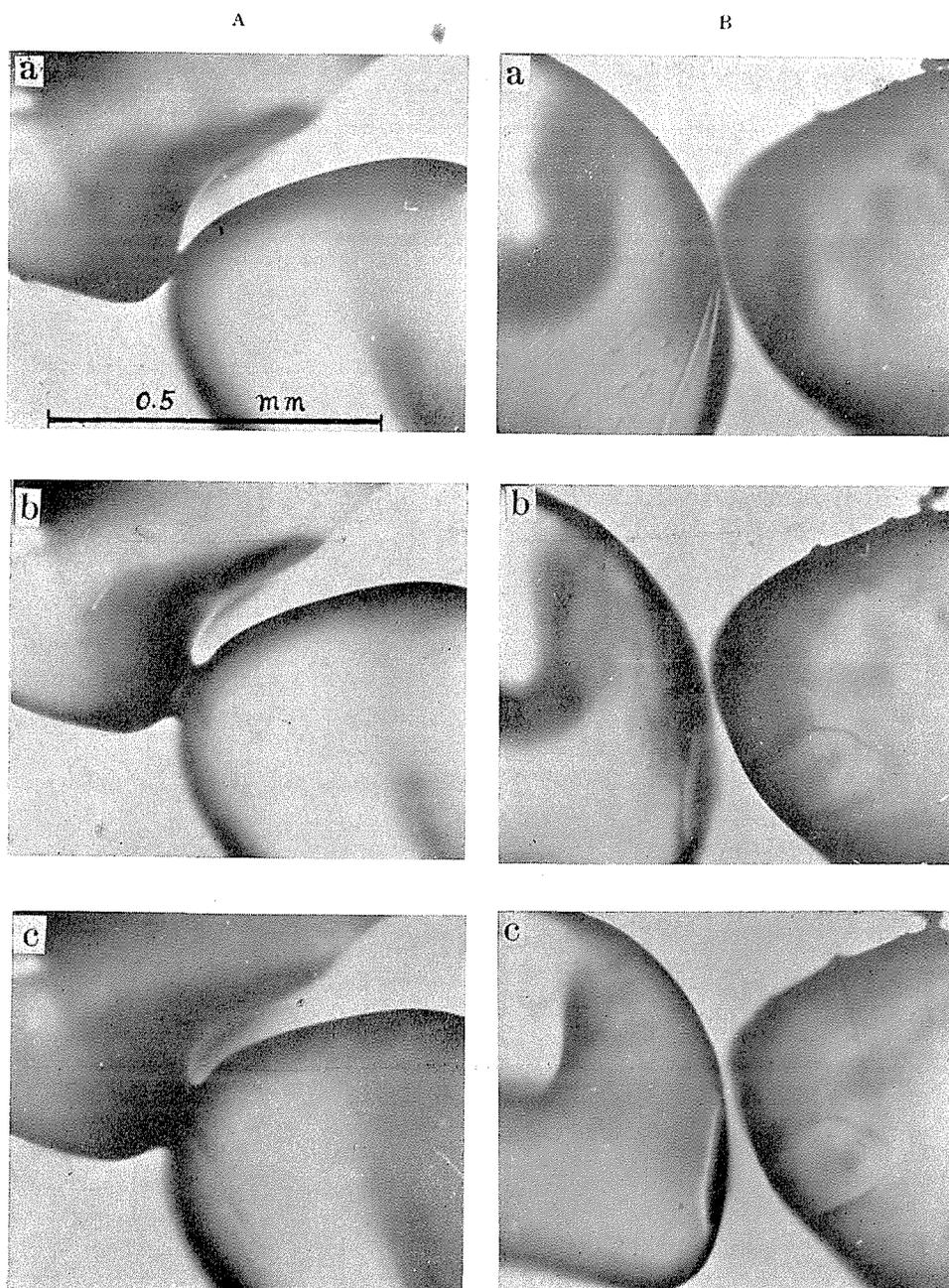


写真6. 二つの雪粒の接触点の変形。(tは接触してからの経過時間)

A 雪粒同志がつかるところ

a) t:  $-14^{\circ}\text{C}$  1時間    b) t:  $\begin{cases} -13^{\circ}\text{C} & 22\text{時間} \\ -6^{\circ}\text{C} & 23\text{時間} \end{cases}$     c) t:  $\begin{cases} -13^{\circ}\text{C} & 22\text{時間} \\ -6^{\circ}\text{C} & 47\text{時間} \end{cases}$

B 完全に接触していない場合

a) t: 1時間    b) t: 45時間    c) t: 15日