



Title	低温型雪結晶の人工生成 序報
Author(s)	佐藤, 昇; SATO, Noboru; 菊地, 勝弘 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 42, 37-50
Issue Date	1983-10-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.42.37">https://doi.org/10.14943/gbhu.42.37</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14103">https://hdl.handle.net/2115/14103</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	42_p37-50.pdf



## 低温型雪結晶の人工生成

### — 序 報 —

佐藤 昇・菊地 勝弘

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和58年3月22日受理)

## Artificial Making of Snow Crystals of Cold Temperature Types

### — Preliminary Reports —

By Noboru SATO and Katsuhiko KIKUCHI  
Department of Geophysics, Faculty of Science,  
Hokkaido University  
(Received March 22, 1983)

In order to study in detail the growth mechanisms and crystalline structure of the snow crystals of cold temperature types growing below  $-20^{\circ}\text{C}$ , a new diffusion type cloud chamber was constructed. Using the new cloud chamber, various types of snow crystals of cold temperature types were made artificially under the temperature conditions below  $-20^{\circ}\text{C}$ . Almost all of cold temperature type crystals grown artificially were already observed under natural conditions by Kikuchi.

### I. はじめに

今日までの雪結晶の研究は Nakaya (1954) にみられるように、主に  $-25^{\circ}\text{C}$  以上の温度領域のものであった。また、この種の研究は Hallett and Mason (1958), Kobayashi (1961) によって  $-40^{\circ}\text{C}$  まで拡張されたが、結晶習性と温度、過飽和度との間の関係に大きな相違はなく、約  $-20^{\circ}\text{C}$  以下では主として温度のみに依存し、角柱系統 (Sheath, Hollow Prism, Solid Column) の結晶が成長することが指摘された。しかし、最近の室内実験や観測から、 $-30^{\circ}\text{C}$  以下の比較的過飽和度の条件下では、角板もかなりの頻度で成長していることが報告された (Anderson et al., 1976; Gonda, 1977; Kikuchi and Hogan, 1979)。一方、Kuroda and Lacmann (1982) は、 $-20^{\circ}\text{C}$  以下で成長する結晶の習性は、温度と過飽和度の両方に依存することを理論的に示した。最近の Gonda and Koike (1982), Kumai (1982) による実験でも、 $-20^{\circ}\text{C}$  以下では角柱と角板の成長頻度が注目された。

これら、低温領域における単結晶の雪結晶の成長とは別に、菊地による南極域での数多くの多結晶雪の発見以来 (Kikuchi, 1969, 1970; Kikuchi and Yanai, 1971), 多結晶雪の成長機構や結晶

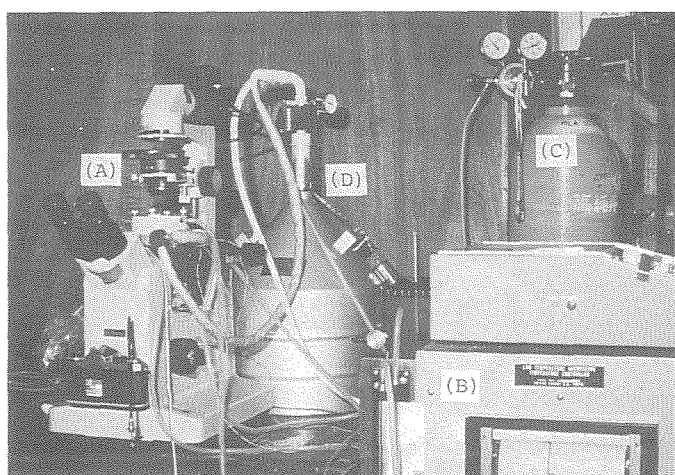
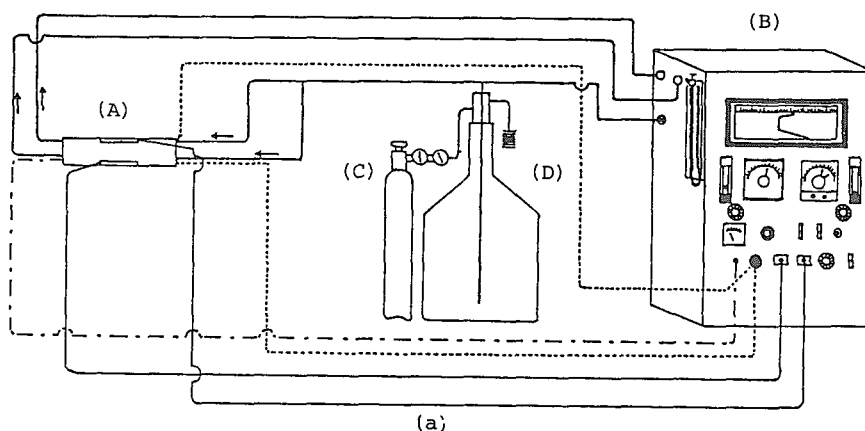
構造が注目されるようになった。Kikuchi and Hogan (1976) はアメリカの南極点基地で偏光顕微鏡を使って、これら多結晶雪の内、特に角柱面の異常に成長した「ゴヘイ型」に代表されるような低温型雪結晶 (奇形雪結晶) の結晶主軸の方向を決定した。さらに、菊地等は 2 度にわたる、カナダ北極圏のイヌヴィック (68°22'N, 133°42'W) における観測で数多くの低温型雪結晶を報告した (Kikuchi and Magono, 1978; Kikuchi et al., 1982; Higuchi et al., 1981)。一方、Kobayashi et al. (1976 a, b) は“Generalized Coincidence Lattice Site”理論や“Cubic Structure”モデルを使って、これら低温型雪結晶の成長機構を説明することを試みている。Kajikawa et al. (1980) はイヌヴィックで、全雪結晶に対するこれらの結晶の出現頻度を求め、また、Kikuchi and Sakamoto (1983) は、北海道での出現頻度を求めた。

このように、低温型雪結晶の成長に関する関心が高まってきたので、これらの雪結晶の結晶構造や成長機構等を実験的に調べる目的で新たに拡散型の低温装置を試作した。この論文では、その低温装置を用いて人工的に生成された低温型雪結晶 (奇形雪結晶) のいくつかの例を紹介する。

## II. 実験方法

低温型雪結晶を人工的に作成するために、新たに拡散型低温装置を製作した。Fig. 1 (a), (b) に装置の概略とその写真を示した。装置は 4 つの部分からなっており、それぞれ低温箱 (A)、温度制御装置 (B)、高圧窒素ガスポンペ (C)、およびジュアピン (D) である。この低温箱は、35 ミリカメラ顕微鏡写真、16 ミリ撮影機による駒撮り映画、またビデオカメラでも観察できるように、倒立顕微鏡のステージの上のせられるようになっている。Fig. 2 (a), (b) は低温箱の詳細とその写真を示している。低温箱は霜の付着を防ぐためにテフロンを素材として作られている。大きさは外径 99 mm、高さ 52 mm であり、また、200 mmHg まで加圧、減圧することが可能で、空気の代りに他の気体を導入することができるように、供給口用の細孔がとりつけられている。また、場合によっては、あらかじめ生成させた氷晶を、この低温箱に降らすために、2 階建雲箱にすることができるように、上部の観測窓を取りはずすこともできる。低温箱内の金属からなる冷却ステージの外径は 40 mm であり、上部ステージと下部ステージの間隔は 6 mm である。

低温箱内の上部ステージと下部ステージは独立に温度制御することができるようになっている。ジュアピン (D) 内の液体窒素は高圧窒素ガスポンペ内の窒素ガスの圧力によって低温箱のステージへ送られ、そこで液体窒素が蒸発することによって、任意の温度にステージを冷却し、液体窒素の流量を温度コントローラー (B) によって自動制御することによって、ステージの温度を自動制御することができる。ステージの表面には細い熱電対がつけられ、上部ステージの表面温度 ( $T_t$ ) と下部ステージの表面温度 ( $T_b$ ) をそれぞれ測定し、両者の温度差から箱内の過飽和度を求める方式である。下部ステージにはヒーターが埋め込まれており、そこでの温度は、温度コントローラー内の光電式任意プログラム設定、調節器により設定温度と冷却速度を制御することができる。一方、上部ステージは任意の一定温度に設定することができ、両ステージはおよ



**Fig. 1.** Schematic diagram of the experimental arrangement for the artificial making of snow crystals of cold temperature types. A : cloud chamber, B : temperature controller, C : nitrogen gas vessel, D : jar of liquid nitrogen.

そ 20 分で室温から  $-70^{\circ}\text{C}$  まで冷却することが可能である。

上下のステージに濡らした濾紙を凍りつけて、氷晶を成長させるための水蒸気供給源とした。ステージの中央部には直径 8 mm の円形の窓がつけられ、顕微鏡による氷晶のその場観察が行われた。窓霜を防ぐために熱せられた窒素がカーテングスとして観察用のガラス窓に常に送られるようにしてある。

上部ステージと下部ステージの間の高さに水平に張られた細い繊維の上で氷晶を成長させた。繊維として、直径約  $5\sim 20\ \mu\text{m}$  の絹糸を用い、実験の初期には、パラフィン蒸気にさらしたものを用いたが、その後は何も処理をしないままの絹糸を用いた。生成された氷晶には、両者による相違はなかった。1 回の実験では、2, 3 本の絹糸がおよそ 1.5 mm の間隔でプラスチックのフレームに張られ、その絹糸の付近の温度 ( $T_a$ ) もまた細い熱電対で測定した。 $T_i$  と  $T_b$  の温

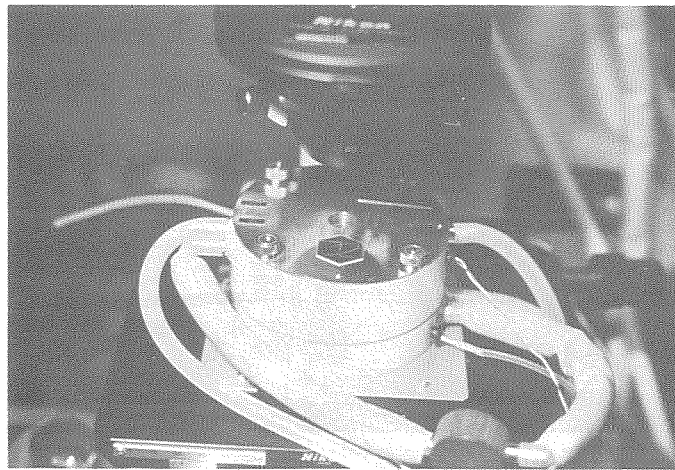
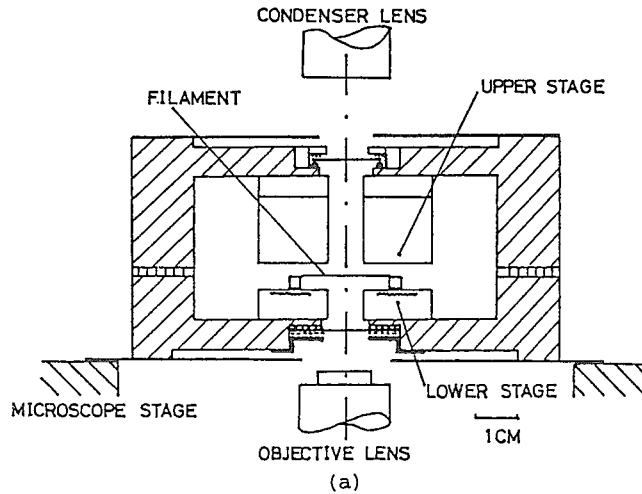


Fig. 2. Schematic figure of the thermal diffusion type cloud chamber designed newly for this experiment.

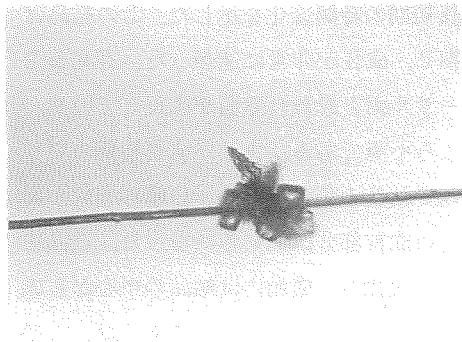
度差をつけることによって、氷晶が繊維上に成長するが、 $\Delta T = T_t - T_b$  が大きすぎると繊維全体が霜でおおわれてしまうので、氷晶が孤立して成長するように  $\Delta T$  を調節した。氷晶が繊維上に出現すると同時に  $T_t$  と  $T_b$  を一定にし、定常状態で氷晶を成長させた。 $T_t$  と  $T_b$  を変えることにより、いろいろな温度、過飽和度の条件下で氷晶を成長させることができた。成長しつつある氷晶を適当な時間々隔で写真に撮り、成長速度を測定した。低温箱をのせてある倒立顕微鏡は、直交ニコルと鋭敏色板を取り付けることによって偏光顕微鏡としても機能し、それによって氷晶の結晶主軸が決定され、またカラー写真をとることも可能である。

### III. 実験結果

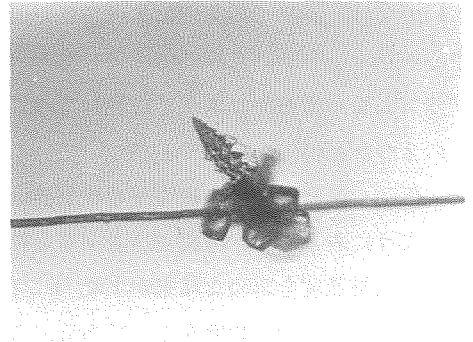
今回の実験は、 $-20 \sim -40^\circ\text{C}$  の温度範囲で氷晶を成長させた。以下に典型的な低温型雪結晶(奇形雪結晶)のいくつかの例を示す。

Fig. 3 は  $-23^{\circ}\text{C}$  で人工的に生成された低温型結晶の成長初期の時間変化を示した。この結晶は中心部から一方向に直線的に成長したもので、先端部は細く、成長が非常に速かった。写真からプリズム面が横方向に次々と成長してゆき、その上にペーサル面と思われる面が成長している。この2つがどのような形で結びついているかは目下のところ不明である。また、成長初期のプリズム面は、偏光顕微鏡の観察から成長部分の中心線の両側で結晶の色が異なり、C軸の方向が異なるようにみえるが、時間が経過すると結晶の中心部に近い成長部分は同じ色になった。結晶先端部の成長速度を求めた結果が Fig. 4 である。縦軸には成長速度を、横軸には結晶の中心から成長部分の先端までの距離をとってある。この成長速度は平均して約  $0.4 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  であった。この測定値は、ペーサル面、プリズム面の理論的な法線成長速度と比較しても大きな値であった。このことは、先端部が突出していることにより結晶表面に取り込まれる水分子が十分に結晶の周りに存在するという理由の外に、先端部に成長し易い機構が存在することを示唆しているように思える。また、この結晶の成長部分の大きさが約  $1000 \mu\text{m}$  で先端部に角柱が2個あられ、直線的な成長が止まった。最終的な結晶の形を Fig. 5 (a) に示した。また、この人工的な結晶に対応すると思われる天然の結晶が同図 (b) に示してある。

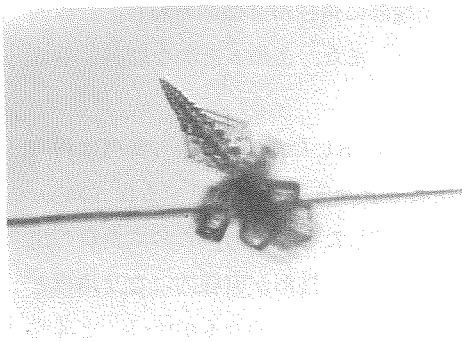
Fig. 3 と同様に直線的な成長をした結晶の時間変化を Fig. 6 に示した。この結晶の特徴は横方向に伸びている部分がペーサル面であることである。この結晶もまた先端部が成長するにつれて、その上に角板状の結晶が成長し、角板の先にさらに六角板が成長した (Fig. 7)。この六角板の成長初期は厚さが薄く、形も丸味をおびていたが、成長するにつれて、外形が直線的になり角板となった。この結晶の直線的に成長している先端部の成長速度は初期には、約  $0.6 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  と非常に速かったが、次第に遅くなった。これは、 $-22^{\circ}\text{C}$  という比較的高い温度条件で成長したものである。この結晶は、北極域でしばしば観測される「かもめ型」の雪結晶 (Kikuchi and Kajikawa, 1979) に対応するものと思われる。成長軸に対して左右交互に scroll が成長した結晶を Fig. 8 に示した。これは  $-20^{\circ}\text{C}$  で成長したが、結晶の中心部は成長初期には角柱集合であったが、次第に a 軸方向の成長が卓越し、骸晶の少ない厚角板の集合になった。結晶の中心部から伸びた部分では、中心線を境界として左右で c 軸と方向が異なっていた。また、左右それぞれの部分は同一平面上にはなく、その成長先端部のスケッチの時間変化を示したのが Fig. 9 である。一点鎖線で示した中心線の両側で c 軸の方向が異なっていた。中心線の両側の部分は左右交互に次のように成長した。Fig. 9 (a) で示した B は前方に成長すると同時に、横方向にも成長し、(b) の段階で紙面の上方にまき込んで scroll になる。またこの段階で (a) の A に対応する A' が明瞭にあらわれる。A' もまた前方に成長するとともに横方向にも成長し、(c) の段階で B' が現われる。B は a 軸方向にその厚さを増す。(d), (e) と時間が経過するにつれて、A' は横方向に成長し、紙面の上方に巻き上げるとともに前方にも成長し、B' が明瞭になった。(f) の段階で B' がまた前方に成長するとともに横方向にひろがり A'' が現われた。その結果、(f) の段階で結晶の先端部は、初めの段階である (a) と同じ状態になった。この結晶はこのような成長を繰り返して前方に成長していった。この時の先端部の成長速度は、Fig. 10 に示されるように平均して約  $0.12 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  であった。



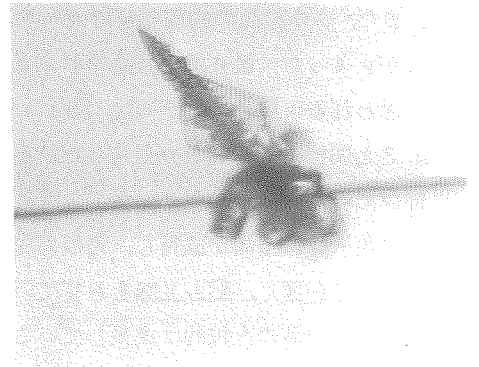
T=0 MIN.



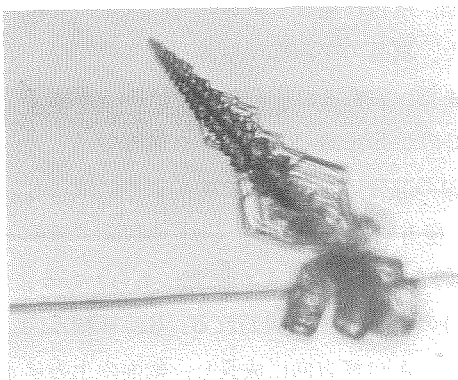
T=4



T=7



T=12



T=19

┌  
100 μm

Fig. 3. Successive growth stages of an artificial snow crystal of cold temperature types.

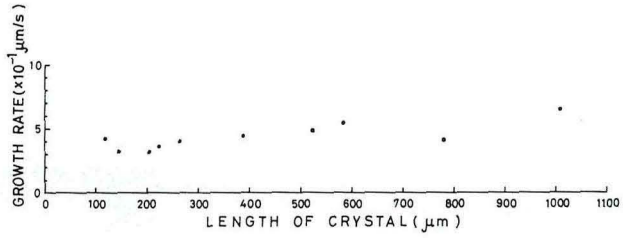
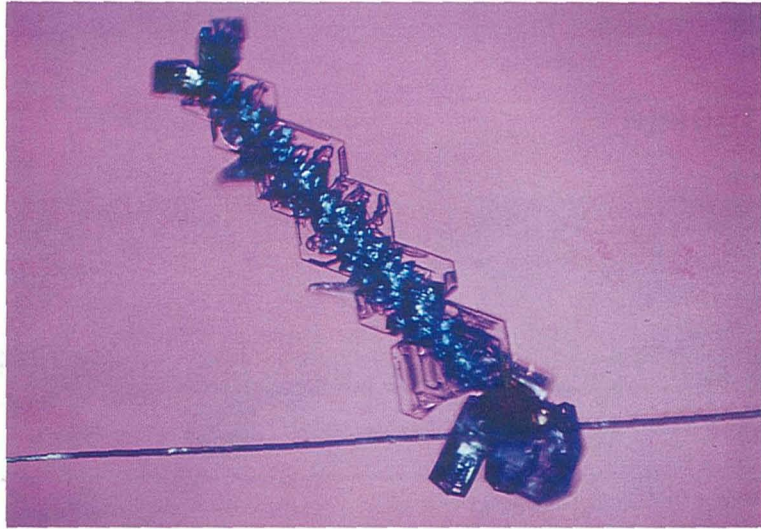
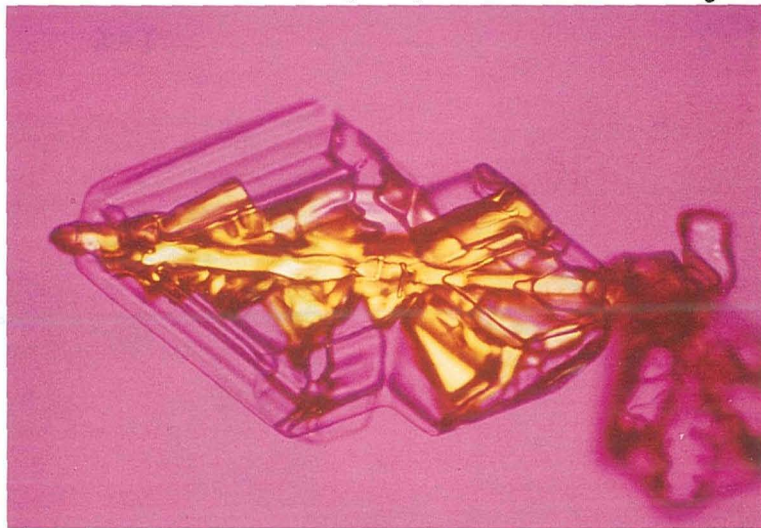


Fig. 4. Time variation of the growth rate measured by successive photographs shown in Fig. 3.



( a )

100 $\mu\text{m}$



( b )

100 $\mu\text{m}$

Fig. 5. Final stage of cold temperature type crystal shown in Fig. 3, ( a ), and natural snow crystal of similar type, ( b ).

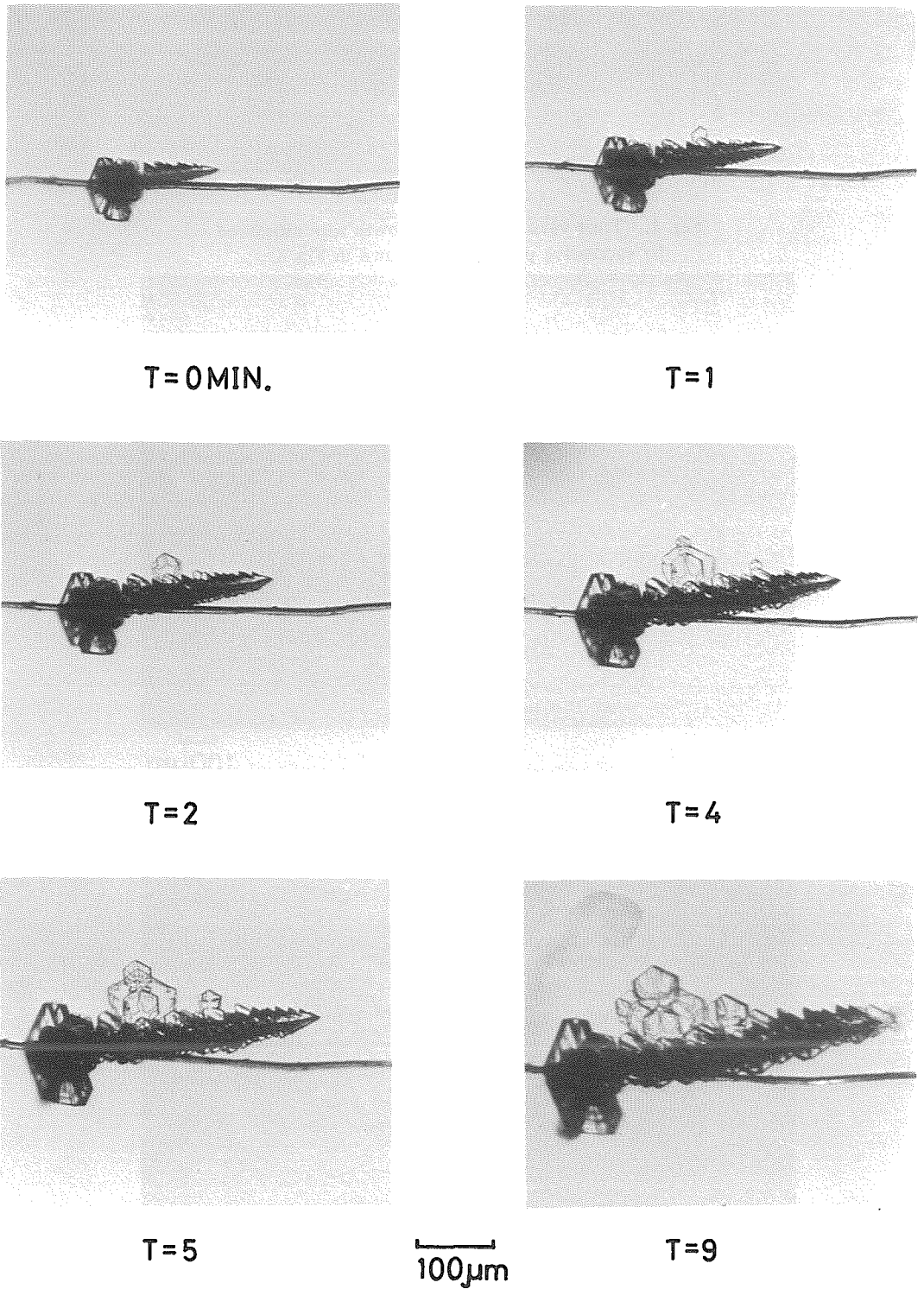


Fig. 6. Successive growth stages of an artificial snow crystal of cold temperature types.

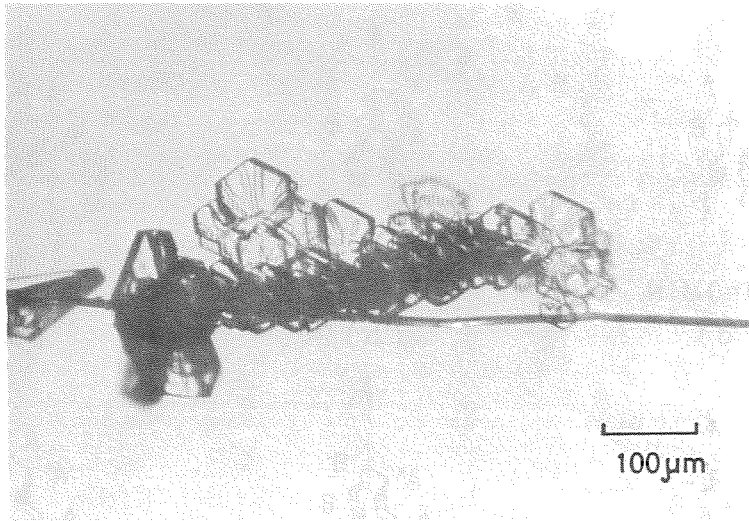


Fig. 7. A final stage of the snow crystal shown in Fig. 6.

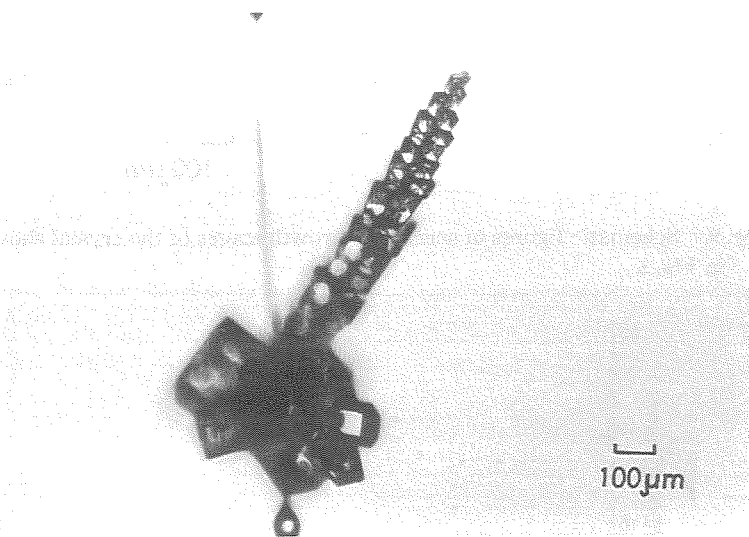


Fig. 8. An artificial snow crystal of cold temperature types.

成長初期には薄かった scroll も時間とともに、 $a$  軸方向にその厚さを増し、不完全な角柱になった。

次に結晶の  $c$  軸の方向が一定の角度をなす多結晶の低温型雪結晶を Fig. 11 (a) に示した。この結晶は  $-32^{\circ}\text{C}$  で成長したが、中心線に対して、まったく左右対称であった。対称線の両側は同一平面上にはなく、ある小さな角度をなしていた。結晶の先端のなす角度は約  $60^{\circ}$  であった。いわゆる「ゴヘイ型」の多結晶の先端のなす角度は約  $80^{\circ}$  であるのに比べて、この結晶の先端の角度は小さかった。この低温型雪結晶は砲弾集合の一部として結晶の中心からでて成長を続けた。Fig. 11 (b) に示した結晶は、厳冬期の北極圏で観測されたものであるが、先端の角度の  $60^{\circ}$  といい、

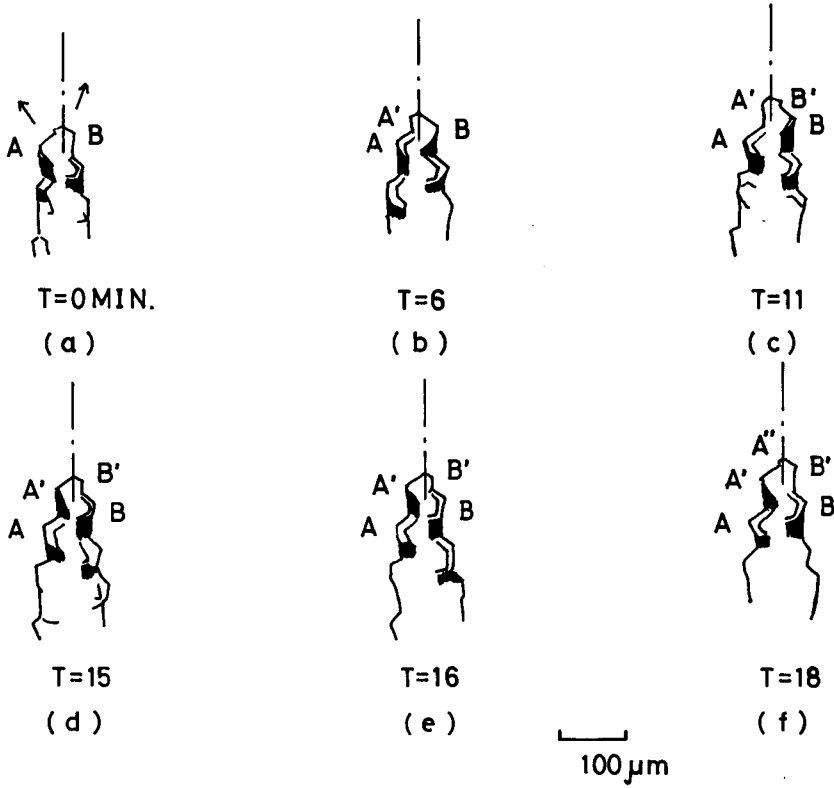


Fig. 9. Schematic figures of successive growth stages of the crystal shown in Fig. 8.

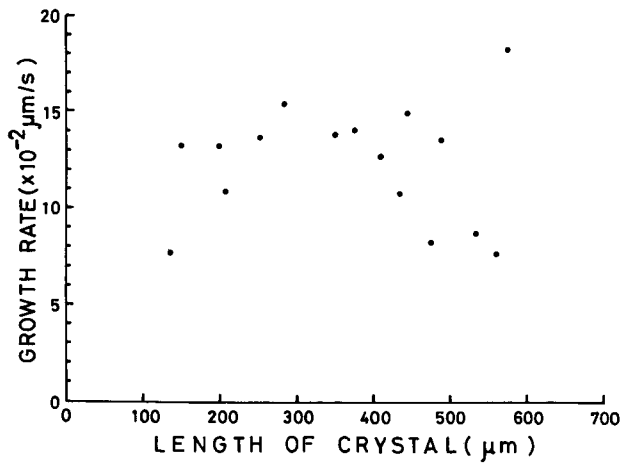


Fig. 10. Time variation of the growth rate measured by successive photographs.

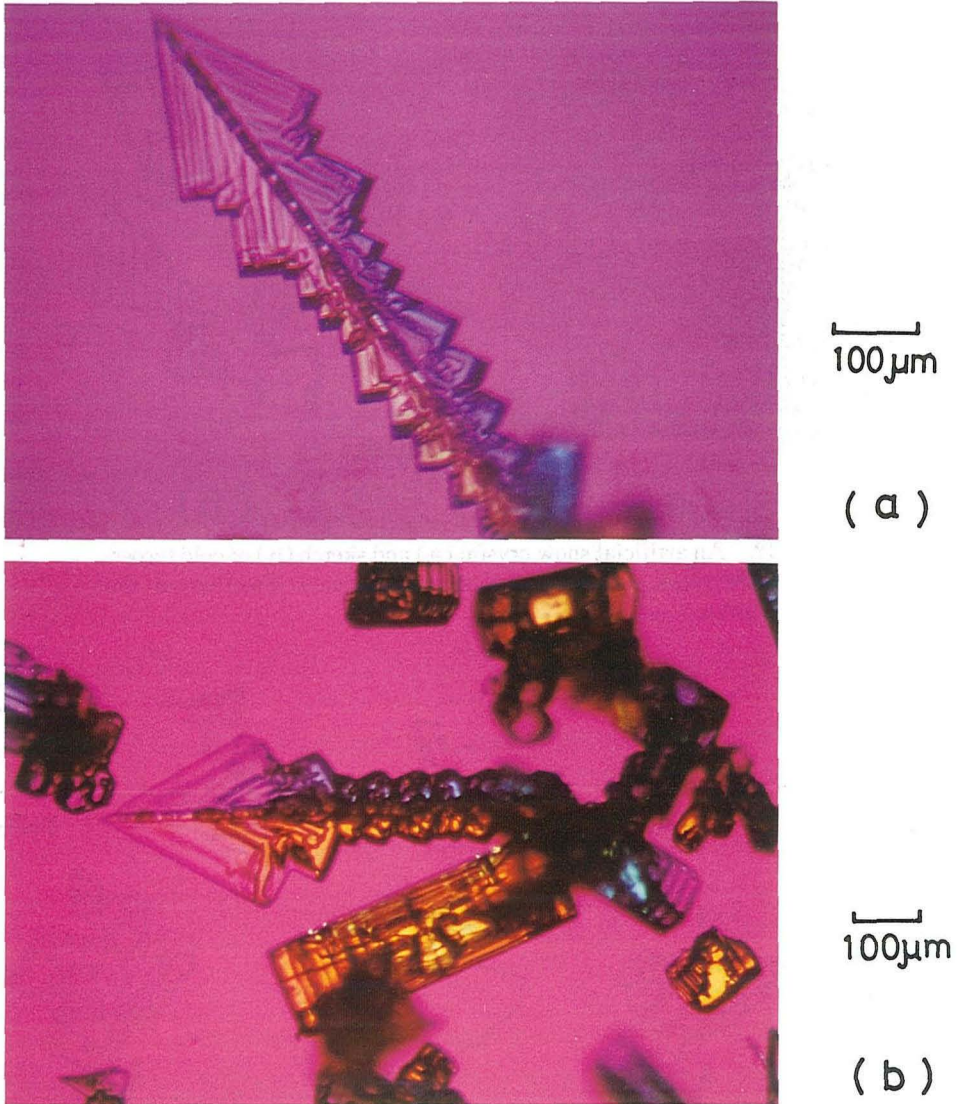


Fig. 11. Polarizing microphotographs of the typical examples of artificial (a) and natural (b) snow crystals of cold temperature types (Gohei shape).

同一の結晶を考えられる。

Fig. 12 (a) は成長の途中でc軸の方向が変化する成長をした多結晶の例である。Fig. 12 (b) で示した結晶のスケッチで斜線のほどこしている部分と、その他の部分とではc軸の方向が異なっていた。この結晶は $-24^{\circ}\text{C}$ で成長したもので、その時間変化を Fig. 13 に示した。T=23 min で結晶は枝分れし、それぞれ左右でc軸の異なる成長をした。この結晶は、プリズム面が横方向に成長したものであるが、この面は時間が経つにつれて、次第にその厚さを増しているのがみられた。また、結晶の端では面が少し内側に巻き込んでいた。このように途中からc軸が変化する

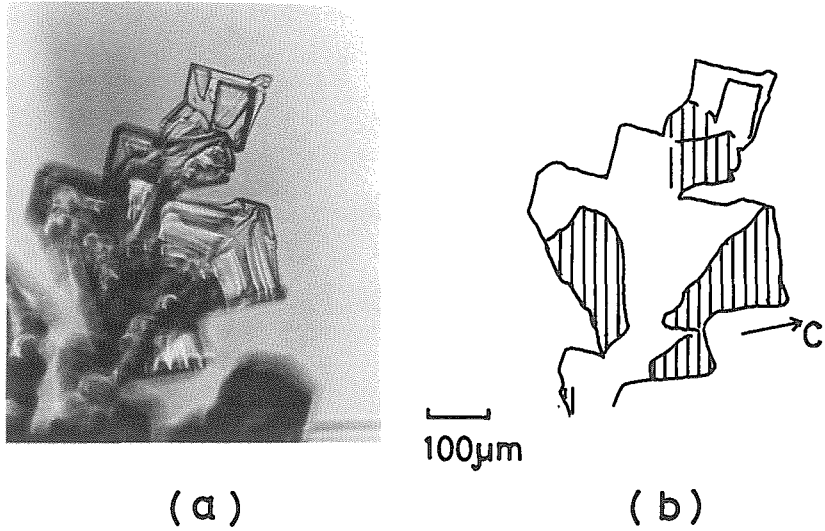


Fig. 12. An artificial snow crystal (a) and sketch (b) of cold temperature types. Shaded areas show the same direction of the principal axis.

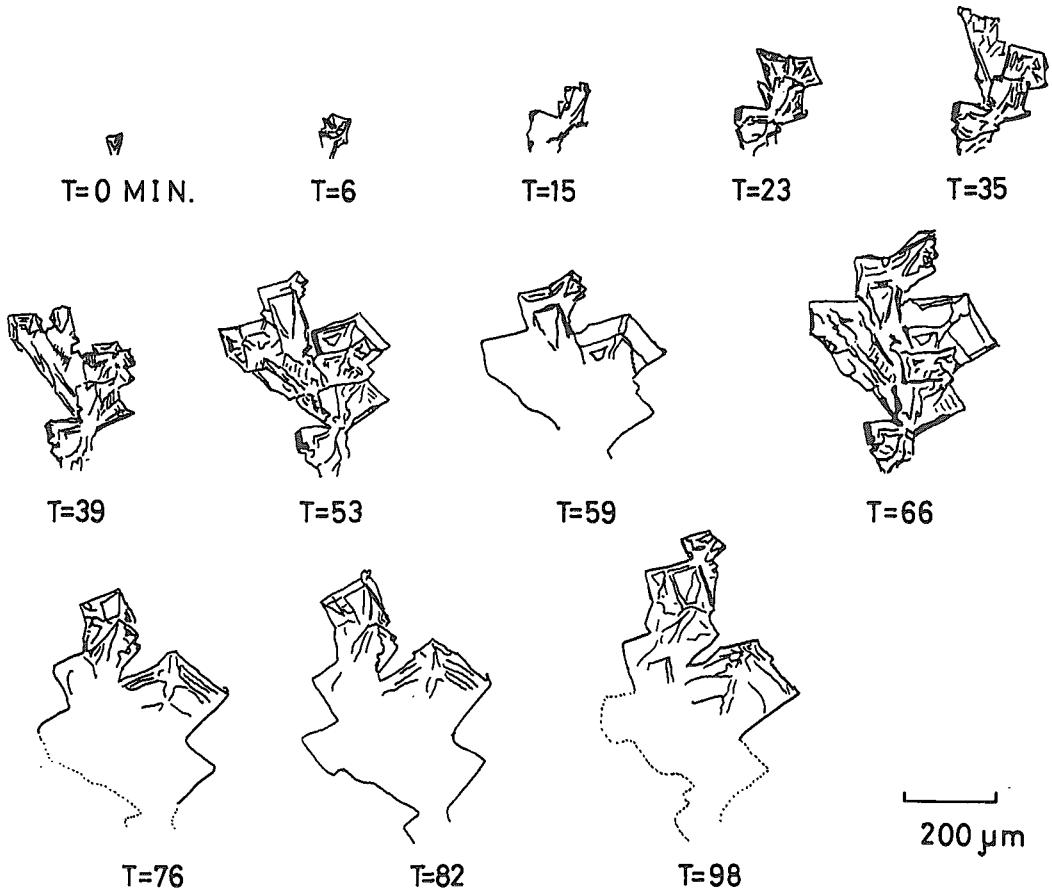


Fig. 13. Schematic figures of successive growth stages of the crystal shown in Fig. 12.

ような複雑な成長をする結晶は天然でも多く観測されている。

#### IV. ま と め

最初、南極で発見され、注目された、いわゆる低温型雪結晶（奇形雪結晶）は、その後アメリカの南極点基地や、厳冬期のカナダ北極圏における観測で数多く発見された。これらの雪結晶の成長機構や結晶構造を調べる目的で、新たに拡散型低温装置を製作し、人工的に成長させる実験を始めた。これまでのところ、天然で観測されたほとんどの低温型雪結晶を実験的に再現することができたが、それらの成長機構や核化の条件などについては今後の研究に待つところが多い。

謝辞 この研究は、昭和 55～57 年度にわたり文部省科学研究費補助金（一般研究 A）「低温型雪結晶の研究」（課題番号 00542018）によって行われたものである。

#### 文 献

- ANDERSON, B. J., V. KELLER, C. Mc KNIGHT and J. HALLETT, 1976. Experimental studies on the influence of crystal defect and surface nucleation mechanisms on the growth habit of ice crystals. *Proc. Int. Cloud Phys. Conf.*, ed. H. K. Weickmann, Amer. Meteor. Soc. Boston, Mass., 97–101.
- GONDA, T., 1977. The growth of small ice crystals in gases of high and low pressures at  $-30^{\circ}\text{C}$  and  $-44^{\circ}\text{C}$ . *J. Meteor. Soc. Japan*, **55**, 142–146.
- GONDA, T. and T. KOIKE, 1982. Growth rates and growth forms of ice crystals grown from the vapor phase, *J. Crystal Growth*, **56**, 259–264.
- HALLETT, J. and B. J. MASON, 1953. The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapor, *Proc. Roy. Soc.*, A **247**, 440–453.
- HIGUCHI, K., T. TAKEDA and K. KIKUCHI, 1981. Observations of Clouds and Precipitation in the Arctic Canada. Organizing Committee for POLEX. 189pp.
- KAJIKAWA, M., K. KIKUCHI and C. MAGONO, 1980. Frequency of occurrence of peculiar shapes of snow crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **58**, 416–421.
- KIKUCHI, K., 1969. Unknown and peculiar shapes of snow crystals observed at Syowa Station, Antarctica. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, **3**, 99–116.
- KIKUCHI, K. 1970. Peculiar shapes of solid precipitation observed at Syowa Station, Antarctica. *J. Meteor. Soc. Japan*, **48**, 343–349.
- KIKUCHI, K. and A. W. HOGAN, 1976. Snow crystal observations in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, **5**, 1–20.
- KIKUCHI, K. and M. KAJIKAWA, 1979. Comments on V-shaped snow crystals observed in Arctic Canada. *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 484–487.
- KIKUCHI, K. and C. MAGONO, 1978. General description of the meteorological conditions and shapes of snow crystals during the observation period at Inuvik, N. W. T., Canada. *Snow Crystals in the Arctic Canada*. Hokkaido Univ., Japan (ed. C. Magono), 4–27.
- KIKUCHI, K. and H. SAKAMOTO, 1983. Observations of snow crystals of cold temperature types made on Hokkaido Island, Japan. *Studies on Snow Crystals of Cold Temperature Types*. Hokkaido Univ., Japan (ed. K. Kikuchi), 1–32.
- KIKUCHI, K., S. TSUBOYA, N. SATO, Y. ASUMA, T. TAKEDA and Y. FUJIYOSHI, 1982. Observation of

- wintertime clouds and precipitation in the Arctic Canada ( POLEX-North). Part 2 : Characteristic properties of precipitation particles. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 1215–1226.
- KIKUCHI, K. and K. YANAI, 1971 : Observation on the shapes of snow crystals in the South Pole region in the summer, *Antarctic Record*, Polar Res. Center, Tokyo, **41**, 31–41.
- KOBAYASHI, T., 1961. The growth of snow crystals at low supersaturations. *Phil. Mag.*, **6**, 1363–1370.
- KOBAYASHI, T., Y. FURUKAWA, K. KIKUCHI and H. UYEDA, 1976 a. On twinned structure in snow crystals. *J. Crystal Growth*, **32**, 233–249.
- KOBAYASHI, T., Y. FURUKAWA, T. TAKAHASHI and H. UYEDA, 1976 b. Cubic structure models at the junction in polycrystalline snow crystals. *J. Crystal Growth*, **35**, 262–267.
- KUMAI, M., 1982. Formation of ice crystals and dissipation of supercooled fog by artificial nucleation and variations of crystal habit at early growth stages. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 579–587.
- KURODA, T. and R. LACMANN, 1982. Growth kinetics of ice from vapor phase and its growth forms. *J. Crystal Growth*, **56**, 189–205.
- NAKAYA, U., 1954. *Snow Crystals, natural and artificial*. Harvard Univ. Press, 510pp.