

雪の結晶の観察*

菊地 勝 弘**

1. はじめに

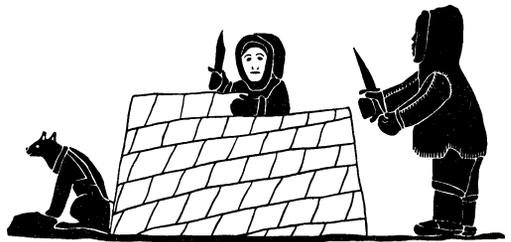
近頃の山々に雪の便りがきかれる頃になると、毎年のように何人かの人達から、雪の結晶を顕微鏡写真に収めたいのだがという問い合わせや、山スキーツアーを計画しているのだけれども、数年前山小屋で観察した樹枝状六花の雪結晶が忘れられず、今度何らかの形でなんとか持ち帰りたいのだがといった問い合わせが必ず来ます。その度に雪結晶の分類のコピーを送ったり、レプリカ作りの手ほどきを書いたり、直接研究室に来られた方にはレプリカの現物を見せて説明したりしてきましたが、雪の結晶に対する関心は高まってきているようにみえます。

雪といえば、降って来る個々の雪結晶、つまり降雪を指す場合と、降り積もったいわゆる積雪を指す場合とがありますが、いわゆる雪についての気象台の観測業務は積雪深や日積雪深等の積雪が主であって、個々の雪の結晶の形やその物理的性質等については対象外となっています。ところが雪に関する問い合わせは、降雪量、積雪分布といったものよりは、雪の結晶の持つ美しさや観測法といったものが多くなっています。また、1年の1/3は積雪に悩まされる地域の人々にとっても実際に雪の結晶の持つ神秘さ、美しさを自分の眼でしかと確かめた人はそう多くはないのではないのでしょうか。写真技術等の進歩にも伴って、必要ならば偏光顕微鏡を使ったり、二色光源法といったテクニックを用いて、雪の結晶をカラーのバックに浮かび上がらせることができ、写真集や図鑑等に引用されていますが、手軽にあの美しい雪の結晶を保存したいといった希望もまたあり、今日はいろいろな面から雪の結晶の観察の仕方、記録のとり方を紹介しましょう。観察の仕方、記録のとり方が分かれば、単に雪の結晶の美しさを保存し、また写真に撮るといっ

たことから、たとえば、降雪強度は？降雪分布は？天気図との関係は？といった別の観方ができ、興味の方向も異なってきて、さらに自然現象との触れ合いが大きくなるのではないのでしょうか。

2. 観察を始める前に

まず、雪の結晶の観察は難しいどころか特殊な装置も必要ではなく非常に簡単なことを強調しましょう。ただ、いつでも降ってくる雪が写真集や図鑑等に見られるような典型的な形をしているものばかりだと思つと落胆するので、普通特に条件のよいところに観測に出かけない限り、いわゆる不規則な何とも言いようのない形、たとえば粉雪と表現されるようなものであることを知っておくべきです。それにはいろいろな理由があります。たとえば、発達した低気圧や寒冷前線による降雪は、大気の擾乱が激しく、個々の雪の結晶はちぎれて破片が多かったり、雲粒付であったりするでしょうし、北海道の日本海側の季節風の時には、あられや不規則結晶が、そして東北の日本海側や北陸では、あられの表面が融けかかっていたり、大きな雪片の場合が多いでしょう。都市に降る雪は浮遊粉塵をたくさん付着して来るので、見にくいものが多いでしょう。一般に、雲層が厚い時は多か



α1

第1図 イグルー（雪洞）を作るエスキモー（ナバタック）。

* On the Observations of Snow Crystals.

** K. Kikuchi, 北海道大学理学部地球物理学教室

れ少なけれ雲粒が付着しているので、とてもイメージとしての雪の結晶とは程遠いものになります。それで、きれいな雪の結晶を捜すとなれば、海岸からかなり内陸に入った場所、北海道では大雪山系の旭岳や十勝岳の山ふとこに抱かれた所が良いとされています。そこでは、夜間の放射冷却により、雪は水蒸気の昇華凝結のみによって成長するので、雲粒の付かない非常にきれいな形をした雪が観測できることになります。こんなふうにしてしまうと、誰もがやる気をなくしてしまいそうですが、いつも条件が悪いということばかりではありませんので、まず億劫がらずにやってみる事です。回を重ねる毎に雪を観る眼がこえてきますし、また愛着も増してきます。

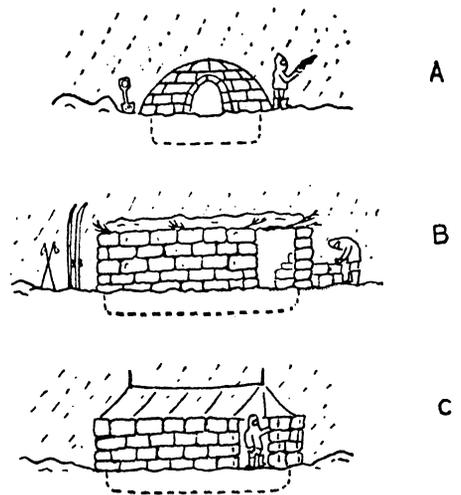
雪やあられば地上気温がプラスの時でも降ってきますが、こんな時の観察はやはり条件が悪くうまくいきません。-5°C以下の気温の時には、特別な冷却をする必要もありませんし、-10°C前後までの時が最も条件が良いでしょう。-5°Cよりも暖かい場合には、観察に使う顕微鏡や雪の結晶を受けるスライドガラスなどを冷やす必要があります、また、冷しすぎるとガラスの表面に霜がついたりしますので、適当な加減が必要です。一方、内陸の盆地や極地方になると-20°C以下になることは珍しくありません。こんな条件では逆に顕微鏡やカメラの油抜きが必要となり、またステージの動きが悪くなったり、手が冷たくなって作業がしづらいといった別の面の問題がでてきます。

さて雪の結晶の観察で最も大切なことは、サンプルした雪の結晶を融かさなことです。これは至極当然のことなのですが、樹枝状六花のきれいな結晶があったりすると、つい興奮して息を吹きかけてしまったりするので注意が肝心です。つぎに、手のぬくもりも大敵です。手袋は、手が冷たくなるのを防ぐと同時に手からの熱で結晶が融けるのを防ぐ役目もしているので、はめた方がよいのですが、あまり厚い手袋だとあとで述べる細かなテクニックを用いる時には不便なので、私達は礼服を着た時に用いる白の薄い手袋をはめ、手袋をはめた手を雪の中に突っ込んで十分冷した上で作業をします。また、作業中は息も大敵です。雪の結晶に息をかけると、融けないまでも結晶の表面に水滴がついたり、またスライドガラスで雪を捕集した時は、そのガラス面上に霜がついて顕微鏡撮影には不都合です。これを防ぐために、マスクを用いたりする人もいますが、私は息をつめて作業し、ときどき後を向いて息をはくことにしています。こ

んなちょっとした心遣いが、きれいな結晶をとる基本になっていることを忘れてはいけません。その他、黒い布をはった板、スライドガラス、ノート、鉛筆等、観察や記録に用いる用具一式はあらかじめ観測する場所の気温に馴染ませておくことはもちろんです。

さて、観察はどこで行なうかが問題ですが、最初は何も形式ばることはなく、電車やバスを待つ間、コートや手袋に降ってきた雪を観ることから始めましょう。不規則な形の雪の結晶の中に、時々はっきりした形をしたものを見ることができます。それは、針状結晶であったり、樹枝状六花からなる雪片だったりするでしょう。何度も何度もじっと見つめる訓練をしている内に、かなり細かなところまで見えるようになります。そうなったら、もうしめたものです。黒い皮手袋の上に乗った0.5mm 足らずの小さな角板結晶が朝の太陽にキラリと光る様を見付けた時、今日は何か良いことがありそうな気になります。

雪の結晶を観察する場所は、雪の結晶が融けない程度に冷えていて、風の通らないところがよい訳ですから裏の物置や、寒い地方では車庫などの片隅など、小さな机を一つ置ける程度のスペースがあれば良いでしょう。適当な小屋がなく、積雪の多い地方なら、エスキモーのイグルー（第1図）や東北地方のかまくらのような雪洞を作ると便利です。雪洞は周りが全部雪でできていますから、温度も湿度も適当で、雪の結晶が融けたり、また昇華したりすることが少ないので、小屋の中での観察より



第2図 雪結晶観測のための雪洞の作り方（樋口、1962）。

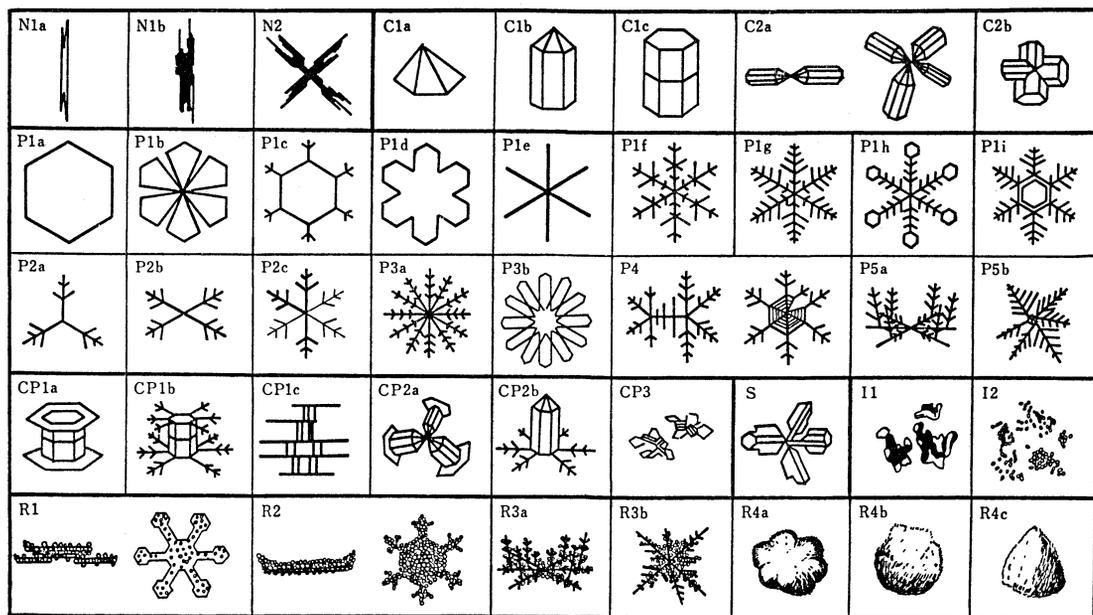
は雪の観察には理にかなっていません。

雪洞は雪のブロックを積み重ねて作るわけですが、雪のブロックは吹溜りのかかなりの圧雪ならば角型のスコップで適当な大きさに掘り出してそのまま積み重さねれば良いのですが、雪が多少とも軟かい時には、数人で肩を組みながら雪の上を何度も往復して、硬くしてからノコギリで適当な大きさに切り出すのが良いでしょう。雪洞はどんな形でも良いのですが、第2図のような形のものがあります(樋口, 1962)。(A)は第1図にも示したイグルタイプのもので、雪のブロックを螺旋状に積み上げ、屋根を円く閉じる方法。(B)は壁だけを雪のブロックで作り、屋根は木の枝や角材で梁を作り、シートや板をかけた上に雪をのせる方法。(C)は(B)と同じく壁は雪のブロックで屋根はテントや東屋風の休み小屋の屋根を利用するといった方法です。実際には(A)の方法は直径2m位のものになると、屋根を閉じるのが難しく、広いスペースのものは作れません。(C)の方法はテントを使う場合にはテントの大きさに限定されるし、また、観測場所に適当な休み小屋があるということも滅多にないので、私達の野外観測にはよく(B)の方法が用いられてきました。近くに建物があつたり、たくさんの薪が積んであつたりするところでは、その壁を利用すると頑丈でしかも手間がはぶけて都合がよいでしょう。観測の目的によって雪洞の広さも異なりますが、2~

3名が常時中に入って仕事するには床面積2m×2m以上の広さが必要でしょう。いずれの雪洞にしても外形ができ上がった段階で、小さな雪の塊で積んだブロックの隙間を防ぐことが必要です。これは、外側と内側の両方から行ないます。こうしないと、吹雪の時など隙間から飛雪が入り込んできて、せっかく採ったサンプルを乱してしまうことになるからです。入口をあまり大きくすることも飛雪が入り易いといったことから好ましくないので、大きな机等を使う場合には適当なところまででき上がったところで机を入れておくことが肝心です。入口には藁や小さなシート、またはビニールのテーブルクロスなどの古いもの等を用いるとよいでしょう。でき合いの机等を持って行けないところでは、雪のブロックを適当な大きさ、高さに積んで、水に雪を混ぜてできたシャベット状のもので固めると立派な机ができます。その上にダンボール箱を開いて一枚にし、固定して天板の代わりにするとなお良いでしょう。いずれにしても、狭い雪洞の中にたくさんの電灯をつけ、多くの人が一度に入ると、雪洞の中が温まり過ぎて外気温との差ができ、外でスライドガラスにサンプルを採って雪洞に入った途端、ガラスに霜がつくことがあるので注意が必要です。

3. 雪の結晶の分類と記録のとり方

雪の結晶の観察の歴史は古く、紀元前150年頃すでに雪の六花についての記述が中国で残されていると言われ



第3図 雪の結晶の一般分類 (Nakaya, 1954).

	N1a Elementary needle		C1f Hollow column		P2b Stellar crystal with sectorlike ends
	N1b Bundle of elementary needles		C1g Solid thick plate		P2c Dendritic crystal with plates at ends
	N1c Elementary sheath		C1h Thick plate of skelton form		P2d Dendritic crystal with sectorlike ends
	N1d Bundle of elementary sheaths		C1i Scroll		P2e Plate with simple extensions
	N1e Long solid column		C2a Combination of bullets		P2f Plate with sectorlike extensions
	N2a Combination of needles		C2b Combination of columns		P2g Plate with dendritic extensions
	N2b Combination of sheaths		P1a Hexagonal plate		P3a Two-branched crystal
	N2c Combination of long solid columns		P1b Crystal with sectorlike branches		P3b Three-branched crystal
	C1a Pyramid		P1c Crystal with broad branches		P3c Four-branched crystal
	C1b Cup		P1d Stellar crystal		P4a Broad branch crystal with 12 branches
	C1c Solid bullet		P1e Ordinary dendritic crystal		P4b Dendritic crystal with 12 branches
	C1d Hollow bullet		P1f Fernlike crystal		P5 Malformed crystal
	C1e Solid column		P2a Stellar crystal with plates at ends		P6a Plate with spatial plates

第4図 雪の結晶の

	P6b Plate with spatial dendrites		CP3d Plate with scrolls at ends		H5c Graupellike snow with nonrimed extensions
	P6c Stellar crystal with spatial plates		S1 Side planes		H4a Hexagonal graupel
	P6d Stellar crystal with spatial dendrites		S2 Scalelike side planes		H4b Lump graupel
	P7a Radiating assemblage of plates		S3 Combination of side planes, bullets and columns		H4c Conelike graupel
	P7b Radiating assemblage of dendrites		R1a Rimed needle crystal		I1 Ice particle
	CP1a Column with plates		R1b Rimed columnar crystal		I2 Rimed particle
	CP1b Column with dendrites		R1c Rimed plate or sector		I3a Broken branch
	CP1c Multiple capped column		R1d Rimed stellar crystal		I3b Rimed broken branch
	CP2a Bullet with plates		R2a Densely rimed plate or sector		I4 Miscellaneous
	CP2b Bullet with dendrites		R2b Densely rimed stellar crystal		G1 Minute column
					G2 Germ of skeleton form
	CP3a Stellar crystal with needles		R2c Stellar crystal with rimed spatial branches		G3 Minute hexagonal plate
					G4 Minute stellar crystal
					G5 Minute assemblage of plates
	CP3b Stellar crystal with columns		H3a Graupellike snow of hexagonal type		G6 Irregular germ
	CP3c Stellar crystal with scrolls at ends				

気象学的分類 (Magono・Lee, 1966)

ています (小林, 1970)。17世紀頃の雪の結晶のスケッチのあるものは、非常によく雪の外形を表わしているものがあります。それは、一つには樹枝状六花の結晶の直径はしばしば数mm以上のものもあるので、条件さえよければ十分肉眼でも観察できる大きさであるからでしょう。このように、雪の結晶には、十分肉眼でも見える10mm程度の樹枝状六花から、顕微鏡でなければ見えない十数μm程度の六角板や六角柱をした初期氷晶と言われるものまであります。いずれにせよ、結晶を見て記録をするためには雪の結晶の形を知っていなければなりません。

雪の結晶は大別すれば、角柱状に伸びるか、角板状に成長するかですが、Nakaya (1954) は第3図に示すように、(N1a)の単針から(R4c)の紡錘状霰までの41種に分け、これを一般分類としました。最近、Magono・Lee (1966) は雪が降ってくる時の気象条件を考慮して、一般分類をさらに細分化し、これを気象学的分類として、第4図、第1表のように(N1a)から(G6)まで

の80種に分けました。大別して針状結晶(N)、角柱状結晶(C)、板状結晶(P)、角柱・板状組合せ(CP)、側面結晶(S)、雲粒付結晶(R)、不定形(I)と初期結晶(G)からなっています。しかし、実際に観察してみても初めて分かることですが、先にも述べたとおり、なかなかスケッチどおりの対称性を基本とした形のものが見つからないことが多いのです。また、基本形が同じ板状結晶の正規六花が降ってきても、百人百様のたとえ通り、どこか少しずつ違っているのが常であり、普通樹枝(P1c)と羊歯状六花(P1f)はスケッチで区別できても実際の結晶はどちらにしてよいか迷うことが多いものです。

観測、観察の目的にもよりますが、あまり細かな分類は、ある場合には繁雑すぎて、かえって現象を複雑にする場合があります。それで、目視観察や虫めがね等による観察では先に紹介した一般分類や気象学的分類より、1949年国際雪氷委員会が制定した第5図に示す実用分類(Mason, 1971)で十分です。この実用分類のうち、1

結晶名	記号	第3図との関係	第4図および第1表との関係
角板		P1a, P1b, P1c	P1a, P1b, P2e, P2f, P2g, CP3d R1c, R2a, G3
樹枝		P1d, P1e, P1f, P1g, P1h P1i, P2a, P2b, P2c, P3a P3b, P4, R1, R2	P1c, P1d, P1e, P1f, P2a, P2b, P2c P2d, P3a, P3b, P3c, P4a, P4b, P5 CP3c, R1d, R2b, I3a, I3b, G4
角柱		C1a, C1b, C1c, C2a, C2b	C1a, C1b, C1c, C1d, C1e, C1f, C1g C1h, C1i, C2a, C2b, R1b, G1, G2
針		N1a, N1b, N2	N1a, N1b, N1c, N1d, N1e, N2a N2b, N2c, R1a
立体樹枝		P5a, P5b, R3a, R3b	P6a, P6b, P6c, P6d, P7a, P7b CP3a, CP3b, R2c, R3a, R3b, R3c G5
つづみ		CP1a, CP1b, CP1c CP2a, CP2b	CP1a, CP1b, CP1c, CP2a, CP2b
不規則		CP3, S, I1, I2	S1, S2, S3, I1, I2, I4, G6
あられ		R4a, R4b, R4c	R4a, R4b, R4c

第7図 雪の結晶の実用分類、一般分類、気象学的分類の関係。

番から6番までの代表的な雪の結晶の顕微鏡写真を第6図に示してあります。この分類では、結晶が雪片からなっているか、それとも濡れぎみであるかといった状態を、付加的特徴として4種に分け、さらに結晶の大きさを5段階に分けて表わすことにしています。したがってこの分類を用いて記録する場合には、たとえば次のように書きます。F2fwDdは結晶の形(F)は樹枝状六花(2)で雪片(f)からなり、少し濡れぎみ(w)でその大きさ(D)は2.0~3.99mm、すなわち(d)の範囲であることを意味しています。またこれを記号では(*)dと表わすこともできます。この実用分類に対する一般分類と気象学的分類との関係は、第7図に示すようになります。

さて、分類ができたので、野帳(記録ノート)には左側から観測日時、結晶形、雲量、雲形、風向、風速(風力階級)など、温度計があれば気温も、その他特に気付いたことなど記入し、新聞天気図の切抜きも貼っておきましょう。一連の降雪の間に、1度や2度の観察ではあまり変化はありませんが、前線の通過時にぶつかると結晶形の急変に驚かされるでしょう。一地点の観測で時間変化を見るのにはたいへんな根気と努力が必要ですが、互に数kmから10km離れた数点(樋口, 1959; Nakaya・Higuchi, 1960; Higuchi, 1962)とか、高度200m毎に数点(Magono *et al.*, 1959, 1960)で、あとに述べるレプリカ法と併せて同時観測をするとかかなりおもしろい結果がでできます。

4. 雪の結晶の観察の仕方

4.1 目視による観察

雪の結晶の目視による観察は、電車やバスを待つ間のコートや手袋に乗った結晶を注意深く観ることから始まりますが、もう少し自宅の庭とか学校で、また山小屋でじっくり観ようという時には、次のものを用意したらよいでしょう。

まず、雪の結晶を見易くするために、10cm×10cm以上の大きさの段ボールかベニヤ板を用意し、その上に黒い布を貼りつけます。ビロードの布が一番よいのですが、無ければ何でも構いません。この黒い板を雪の降っている中にさらし、雪の結晶を捕集するのですが、あまりたくさん板の上に乗りますと眼うつりがし、かえって観察しづらいので、適当な間隔に乗った段階でやめ、雪洞なり物置に入って肉眼や虫めがねで観ます。樹枝状六花はすぐ分かりますが、慣れてくるとたくさんある小さな結晶の中でも、これかと思うものがすぐ眼につくよ

うになります。観測日時、板に乗った結晶のうちの代表的な形を、スケッチなり記号なりを使って野帳に記入します。一通り見終わったら、板の表面をガーゼで軽くふきとり、次の観測にかかります。5分から10分間隔で続けるのが普通です。しかし、目視観測はやはり目視観測で、野帳にはスケッチか記号でしか残りませんので、間もなく物足りなく感じるようになるのではないでしょう。

4.2 顕微鏡写真観察

雪の結晶の形が自分の眼でかなり観れるようになると、樹枝状六花の繊細な構造や虫めがねでははっきりしなかった小さな角板や角柱を、顕微鏡を通してみてみたいと思うようになるのは当然の成り行きでしょう。それにまた、あまりに有名な Bentley (1931) や Nakaya (1954) の写真集を見ると、一度は顕微鏡で雪の結晶を観たくなるものです。顕微鏡も最近では小・中学生を対象にしたものがかなり多く出まわっているので、比較的容易に観ることができるでしょう。しかし、顕微鏡写真撮影が可能なものとなるとどんな顕微鏡でもという訳にはゆきません。顕微鏡とカメラを継ぐ撮影装置、アダプターが必要ですし、それに使えるカメラも限られてくるからです。これらの装置一式が一応手に入ったとして、顕微鏡写真撮影の注意をしてみましょう。もちろん、これら一式は先に述べた雪洞や物置の中の机の上にセットされているのですが、顕微鏡も雪の結晶を捕集するスライドガラスも十分外気温になじませておく必要があります。

さて、何のために顕微鏡写真を撮るかということが問題となります。つまり、単にきれいな雪の結晶の写真を撮るのか、それとも現に降っている雪の代表的な結晶形を撮るのかということになります。きれいな雪の結晶の写真を撮るためには、先に述べた黒いビロードの布を貼った板にスライドガラスをのせ、その上に降ってきた雪の結晶をガラスごと顕微鏡のステージに乗せてきれいな結晶を捜すか、または黒い板に直接降ってきた雪の結晶を捕集し、肉眼できれいな結晶を選び、燐寸の軸を折ったささくれや爪楊枝の先等を使って釣り上げ、ステージの上のスライドガラスにのせるといった方法がよくとられます。この場合、軸先をほんのちょっと舌で濡らすとうまくゆきますが、非常に小さな初期結晶等にはこの方法はとれません。代表的な結晶を撮る場合には雪の乗ったスライドガラスをステージに乗せ、手際よく十字動装置で移動させ、全体の種類を調べて代表的なものを撮影

します。とは言っても、どうしてもきれいな結晶を撮ることになり、ある程度の選択性が入ってしまいます。

いずれにしても、きれいな写真を撮るためには、スライドガラスが汚れていては無理ですので、常に何枚かのスライドガラスを用意しておき、使用する直前には必ず磨くようにすることが大切です。撮影しようと思う結晶の傍に他の結晶があったり、またちぎれた樹枝状六花の枝の1本が付着していることがあります。これらは先程の軸先でうまくやると取ることができます。あまり不必要なものを取ることに専念していると、その間の一寸した時間にも結晶の昇華蒸発がすすんでいるので、肝心の写真が撮れなかったり、結晶の周辺部が大分丸味を帯びてしまったりということがありますから、まず必要な写真を一枚撮ってからイジル方が賢明です。また顕微鏡写真撮影の場合には、顕微鏡のステージの上のスライドガラスが撮影装置のファインダーを覗いている間中、常に呼気のかかる位置にあるので、息はつめて、時々横か後方にはく注意が必要です。特に極地のような外気温の低いところでは、ちょっとした息がスライドガラス一面に霜を作ります。

-10°C以下の気温で長く顕微鏡を使用する場合には、あらかじめ油抜きをし、耐寒潤滑油にしておく必要があります。-20°C近くになると、撮影装置のシャッターや自動露出のコントロールボックス等にトラブルを生じることが多くなり、またカメラに装填したフィルムのパーフォレーションが切れたり、-30°C以下ではフィルム自体が捲き上げの時バリバリになって切れることがあります。これらを防ぐために、北国で水道栓凍結防止用に使用しているテープヒーターを使用することをお勧めします。まず、カメラまたはカメラボックスには裏蓋を形どった金属性のカバーを作り、それに幅広のテープヒーターを両面に貼り合わせると十分です。顕微鏡は幅の狭いテープヒーターを巻きつけるだけで十分です。最近、モノクロームフィルムとカラーフィルムをそれぞれ装填したダブルカメラ方式も使われるようになりましたが、これも1本の幅広のテープヒーターで十分-40°Cの気温に耐えられます。カメラや顕微鏡は一度雪洞の中や、観測小屋にセットしたら、観測期間中はそのままにし、何度も室内に持ち込むようなことをしない方が良く、また、終わった段階で室内に持ち込む時は大きなビニール袋で密封し、冷え切った器械への結露を防ぐように心懸けて下さい。

雪の結晶の大きさは、10数 μm の氷晶から10mm程

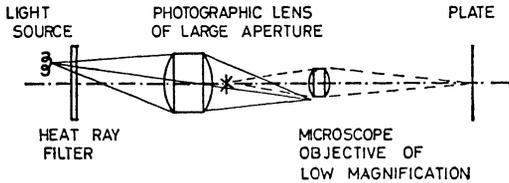
度の樹枝状六花まで、かなり広範囲にわたるので、レンズは低倍率から高倍率まで、総合倍率にして4倍から400倍位までが必要となります。10mmを越える大きな結晶は、どうしても一駒には入り切れず、半分に分けて撮ったりすることも時にはありますが、これをきれいに撮るためには、最近開発された低倍率のマクロ写真装置を使わねばならないでしょう。

最近の顕微鏡は光源内臓型のもが多くなっていますが、やはり、トランス付の6V30Wの照明装置が一般的です。いずれの場合も、トランスの操作一つですぐ豆電球が切れますので、補助の電球は多目に用意するのがよいでしょう。比較的気温の高いところでの観測の場合には、熱線吸収フィルターを準備した方が良いでしょう。交流電源の使えない山小屋等では、角型の懐中電燈や登山用のキャップライトが使用されましたが、光量の大きいものとして単一乾電池6個使用した強力ライトが好適ですが、電池の消耗もまた激しいので電池を多目に用意しなければなりません。照明に電池を使う場合、もっとも注意しなければならないのは、電池の消耗による明るさの低下と、昼と夜とでの明るさの判断の誤りからくる不適正な露出です。せっかくの努力が水泡に帰さないように、モノクロフィルムの場合は現場での試し現像、また何本おきかの現像をすることをぜひお勧めします。

さて、次に顕微鏡写真撮影の具体的ないくつかの方法を紹介しましょう。

(a) 反射鏡を斜めにする照明法

雪の結晶の顕微鏡写真撮影には、透過光、反射光、斜めの透過光の3種の光のあて方が用いられますが、透過光は最も一般に用いられる方法で、バックの白地に雪の結晶の輪郭が黒く写り、反射光は黒地のバックに結晶の輪郭が白く写ります。結晶の内部の構造と表面の凹凸、それに結晶の厚みを陰影としてとらえる斜めの透過法がしばしば用いられます。これは、顕微鏡の下にある反射鏡を斜めにして、光源からの光をそらせ、視野の一方がわずかに薄暗くなる程度にすると、表面の凹凸があざやかに浮き出てくるというものです。しかし、低倍率のレンズを使用した時は視野のむらがひどくならないよう気を付ける必要があります。ファインダーでのわずかのむらが写真にするとした以上にコントラストが強くて、失敗する場合があります。最近の光源内臓型の顕微鏡では、この反射鏡を斜めにする透過光の芸当ができないのは残念です。第6図の1.角板と2.樹枝はこの方法で撮影したものです。単なる透過光で撮影した写真と見比



第8図 斜めの透過光による照明法 (Nakaya, 1951).

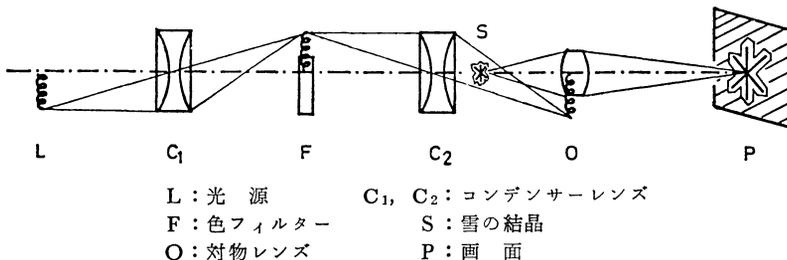
べて下さい。ちょっと反射鏡を左右に振っただけで随分違って見えることに気付くでしょう。

(b) 斜めの透過光による照明法

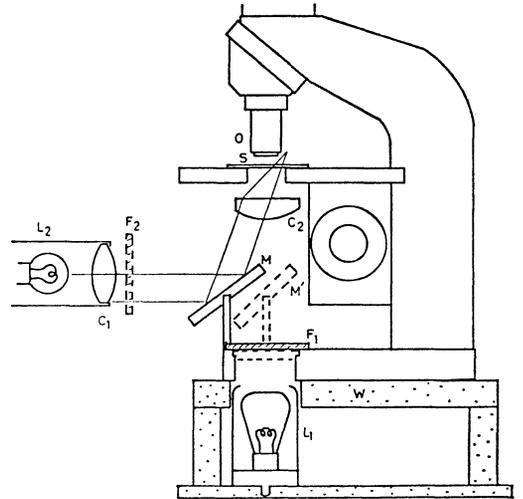
この斜めの光を使って、視野にむらを作らずに結晶を鮮明に撮る特別の光源が工夫されています (Nakaya, 1951)。第8図はそのための光学系で、大口径レンズを使って光源の像を顕微鏡の対物レンズの隅に結ばせることにより、一様な明るさの視野の中に、輝く結晶を立体的に描写することができます (樋口, 1962)。

(c) カラー撮影のための斜めの照明法

雪の結晶の美しさを、ある色をバックにして白く浮き上がらせるといったカラー写真に有効な技法が吉田 (1960) によって考案されました。これは、第9図に示されるように、第1のレンズによる光源の実像の位置に色フィルター、たとえばバックを青にしたければ青フィルターを置いて、光源からの光の半分を青に変え、フィルターを通らない光は第2のレンズで顕微鏡の対物レンズの隅に結ばせるようにしてあります。こうすることによって、視野の中には青フィルターを通った光だけが入り、青の様なバックになり、雪の結晶は青をバックに斜めの照明によって白く輝いて浮かぶことになります。白色光の部分も別の色フィルターを通すと、二色つまり青のバックに黄色の結晶を浮かび出すことも可能になります (樋口, 1962)。



第9図 カラー撮影のための吉田の照明法 (樋口, 1962)。



第10図 二色光源によるカラー撮影のための照明法 (小林, 1969)。

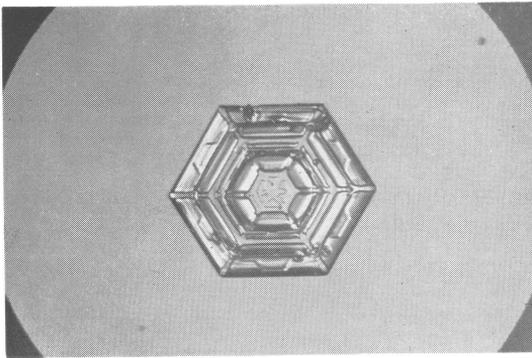
(d) 二色光源による照明法

実際に上に述べた光学系を普通の顕微鏡に組み込むことがなかなか面倒なことから、小林 (1969) は光源を二つ使って、吉田の照明法を適用した簡単な方法を考案しました。第10図はその装置の概略を示しています。この照明方法が可能な顕微鏡は、鏡基の底の反射鏡 (M') が円形の台座ごと取り外しが可能で、反射鏡を取り外した後に、小型の照明装置がはめ込めるものに限られます。まず反射鏡を台座ごと外し、開孔部に色フィルター (F₁) を置き、その下にサブステージランプ (L₁) を取り付けてバックの色照明にします。そのため、サブステージランプが納まるような、しかも顕微鏡を載せる丈夫な台 (W) が必要になります。この台の上板には、鏡基の反射鏡の台座に合わせて孔をあけておきます。反射鏡 (M) は台座を外した後の開孔部の縁近くにしっかり固定します。雪の結晶を白く光らすためには、別に顕微鏡

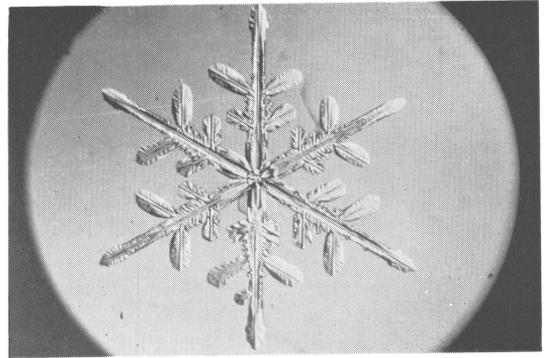
番号	記号	代表的な形				結晶名
1					角板	
2					樹枝	
3					角柱	
4					針	
5					立体樹枝	
6					つみ	
7					不規則	
8					あられ	
9					凍雨	
0					ひょう	

<p>粒子の形状(F)</p>	<p>付加的特徴</p> <p><i>m</i> * 破片</p> <p><i>r</i> * 雲粒付き</p> <p><i>f</i> (*) 雪片</p> <p><i>w</i> (*) ぬれざみ</p>	<p>粒子の大きさ(D)</p> <p><i>a</i> 0~0.49mm. 非常に小さい</p> <p><i>b</i> 0.5~0.99mm 小さい</p> <p><i>c</i> 1.0~1.99mm 中くらい</p> <p><i>d</i> 2.0~3.99mm 大きい</p> <p><i>e</i> 4.0mm以上 非常に大きい</p>
-----------------	--	--

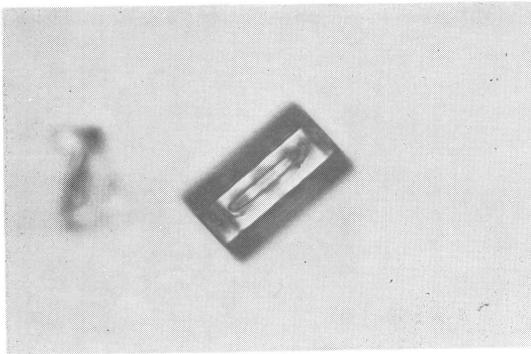
第5図 雪の結晶の実用分類 (Mason, 1971).



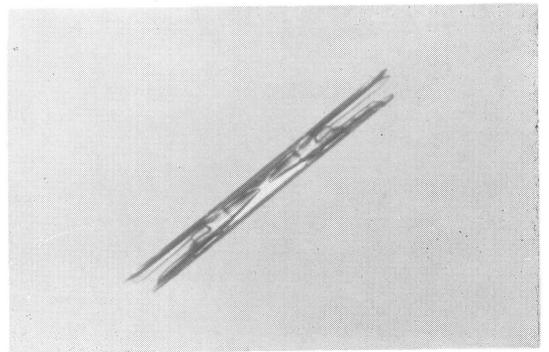
1. 角板



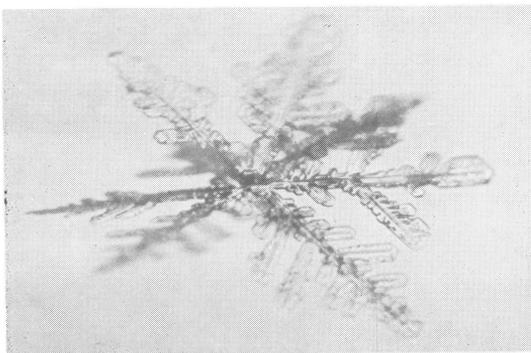
2. 樹枝



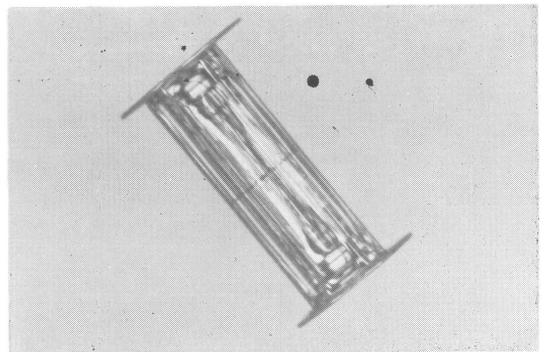
3. 角柱



4. 針

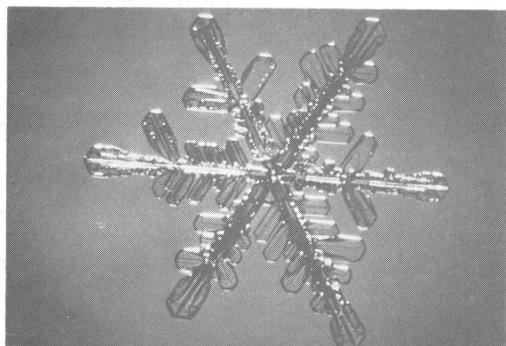


5. 立体樹枝 (放射)

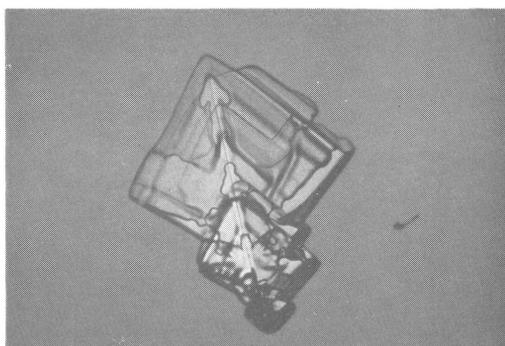


6. つづみ

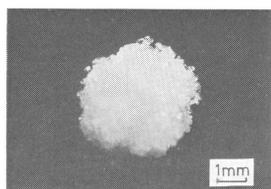
第6図 第5図実用分類の1~6に対応する代表的な雪結晶の顕微鏡写真。



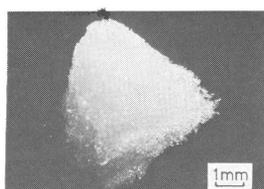
第11図 二色光源法による樹枝状六花の顕微鏡写真 (カラー) (小林, 1969).



第12図 奇形雪結晶の偏光顕微鏡写真 (カラー) (Kikuchi・Magono, 1978).



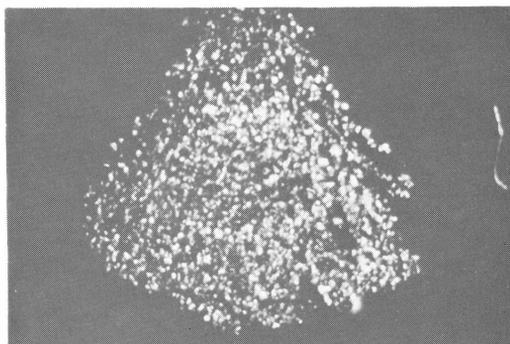
(a)



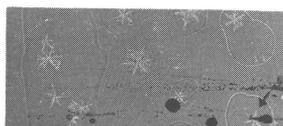
(b)

第13図 あられの反射光による顕微鏡写真

(a) 塊状あられ (b) 紡錘状あられ.



第14図 あられの薄片の偏光顕微鏡写真 (カラー) (Harimaya, 1977).



(a)



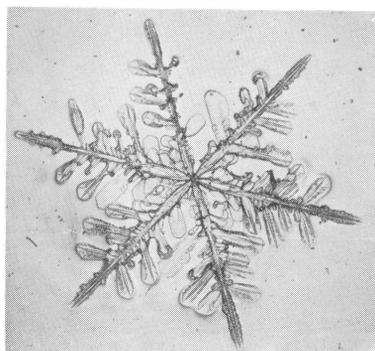
(b)

第15図 (a) 南極昭和基地での樹枝状六花のレプリカ密着写真 (1968年5月2日9時55分, 3分間露出).

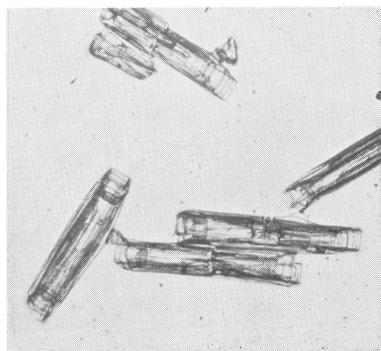
(b) 南極点基地での角柱結晶のレプリカ密着写真 (1975年1月27日10時35分, 2分間露出).

(c) (a) の矢印の結晶の顕微鏡写真.

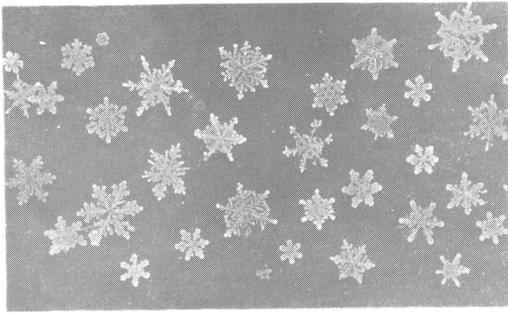
(d) (b) の矢印付近の結晶の顕微鏡写真.



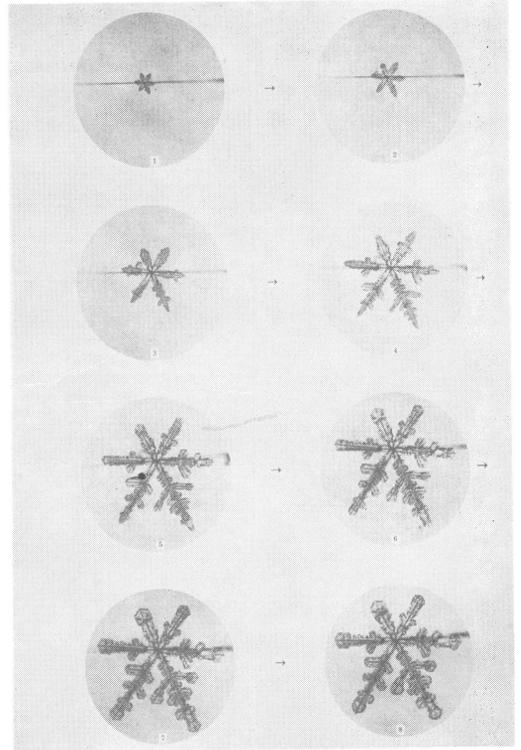
(c)



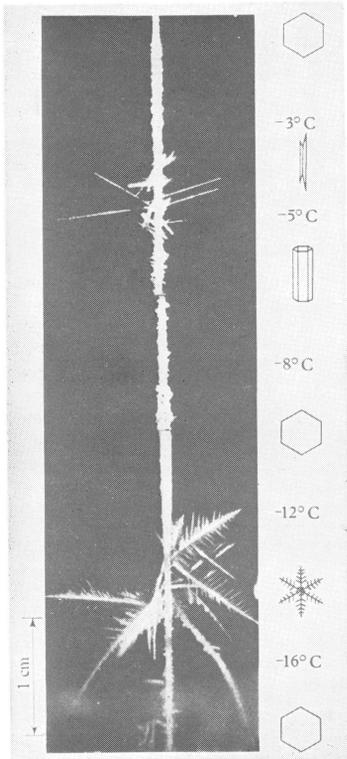
(d)



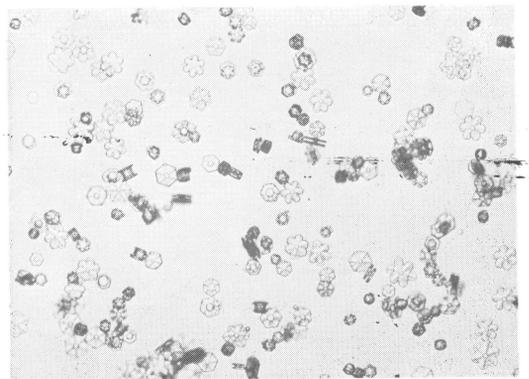
第16図 雲粒付樹枝状六花のレプリカ引伸写真 (1977年1月, カナダ・イヌヴィック).



第20図 第19図の条件で成長した樹枝状六花 (写真番号1→8は第19図の1→8に対応している).



第22図 Hallett・Mason の人工雪装置によって同時に作られた雪結晶. 上から, 角板, 針状, 中空角柱, 角板, 普通樹枝, 角板の順で成長しているのが分かる. 写真の右側は雪結晶の位置の温度とスケッチを示している.



第24図 フリーザーの中に作った氷晶の顕微鏡写真 (谷口恭), (直径 $15 \mu\text{m}$, -24°C の過冷却雲粒に沃化銀の煙で種播きをして10分後にスライドガラス上に捕捉したもの, 氷晶の大きさは約 $30 \mu\text{m}$).

用の標準照明装置 (L_2) を用意し、反射鏡 (M), コンデンサーレンズ (C_1, C_2) を操作して斜めの照明を行います。バックの色の明るさと、結晶の輝きとのバランスは、二つの光源のトランスをそれぞれ独立に調整することで得られます。雪の結晶にも色をつけたい時には、標準照明装置 (L_2) に適当な色フィルター (F_2) を挿入することによって可能になります。この方法によって撮影された写真が第11図 (原図はカラー) です。

(e) 偏光顕微鏡による撮影

上に述べた方法は、いずれも雪の結晶の美しさを、バックの色とのコントラストからいっそう強調しようとしたもので、最近の図鑑や写真集に時々見られます。

しかし、これらとは別に、雪の結晶も「結晶」ですから、偏光顕微鏡を使うことによって結晶の内部構造の一面を知ることができます。偏光顕微鏡の取り扱いには専門書 (たとえば 坪井, 1959) にゆずりますが、これを使って結晶軸の違い、つまり雪の結晶が単結晶であるか、多結晶であるかを容易に識別することができます。板状結晶や角柱状、針状結晶の結晶主軸の方向はもはや問題ありませんが (Magono・Suzuki, 1967), 最近、低温の条件下で頻繁に見られるようになった、いわゆる奇形の雪結晶の結晶軸の方向を決める場合に、偏光顕微鏡は有用な手段の一つになります (Kikuchi・Hogan, 1976)。樹枝状六花や角板のような板状結晶をスライドガラスの上に平らに乗せて偏光顕微鏡で見ると、結晶主軸が顕微鏡の光軸に平行なために、結晶を回転ステージと共に回転させても色の変化は現われませんが、結晶主軸がスライドガラス上に横、すなわち光軸に対して垂直に置かれた角柱や針状結晶は、ステージを回転させると共に、530 μm の鋭敏色板のピンク色をバックに青から黄色へと変化します。その色合いは、青のバックに雪の結晶を白く浮かび上がらせた照明法の場合と同程度に美しく、寒さも忘れて顕微鏡にかじりつくことになります。第12図 (原図はカラー) は、偏光顕微鏡によって撮影された奇形雪結晶の写真です。色の違いは結晶主軸の違いを表わしています。したがって、この方法によれば、雪の結晶の表面に付着凍結した雲粒や凍雨が母結晶の雪との関係でどのように凍結しているかも色の具合から判断できるのです。

(f) あられ、ひょうの薄片の撮影

あられやひょうはその厚みのために透過光で撮影すると、ただ黒い塊としか写らないので、あられやひょうを黒い布を貼った板の上か、黒い紙の上のせて反射光で

撮るのが普通です。そうすると、黒いバックに白いあられやひょうの表面のキラキラ輝いているのも見ることができます (第13図)。しかし、あられを構成している雲粒が、どのような凍り方をしているか、またひょうの内部構造がどのようになっているかは、表面からだけの観察では分かりませんので、薄く切って偏光顕微鏡で観察します。薄く切る際、あられやひょうの構造が壊れてはまずいので、アニリン溶液で固定する方法がとられています (Kinoshita・Wakahama, 1960)。アニリンで固定された結晶は低温下で小さな鉋で薄く屑られ、偏光顕微鏡で観察します。このようにして作られたサンプルは、薄片 (thin section) と呼ばれています。第14図 (原図はカラー) は紡錘あられの薄片の偏光顕微鏡写真の一例です (Harimaya, 1978)。

雪の結晶の生物顕微鏡によるモノクローム写真、偏光顕微鏡によるカラー写真の場合でも、顕微鏡写真撮影にはカメラの絞りに相当するものがありませんから、露出はシャッタースピードだけで決まることになります。もちろん、使用する顕微鏡の総合倍率、光源の明るさ、使用するフィルムの感度でシャッタースピードは異なりますが、倍率が10倍から50倍、光源が6 V 15Wの内臓型、フィルムが ASA 100 だとしますと、1/8 秒から1秒が適正露出になります。トランス型の光源、あるいは普通の100V 40Wの電球を使う場合には光源から顕微鏡までの距離によっても違いますので、どうしても現地での試し現像が必要です。現地ではカラーフィルムの試し現像が直ぐにはできませんから、そんな時はカラーフィルムの ASA 感度、普通使用するものは ASA 100 ですから、同じ感度のモノクロームフィルムの SS を用意して試し現像するのが良いでしょう。

全ての観測が終わったら、顕微鏡、トランス等は大きなビニール袋に入れて密封し、結露させないような注意が肝心です。

4.3 プラスチック・レプリカ法による観察

雪の結晶を何とかそのままの形で保存したいと思うのは、あの千差万別の美しい結晶を見た人の誰もが希望することに違いありません。それと同時に、目視観察にしろ顕微鏡観察にしろ、観察する結晶の数は限られるし、そのうえどうしても主観が入るので、降っている雪を忠実に記録したことにはならないし、したがって降雪強度の算定にも誤差が生じることになります。そのためいろいろな努力が払われてきましたが、合成樹脂を使った非常に簡便で秀れた方法が、Schaefer (1941, 1942) に

よって考案されました。この方法は、目視と顕微鏡観察を兼ね合わせたようなもので、プラスチック・レプリカ法(略してレプリカ法)と呼ばれ、Dichloroethane(ジクロロエタン, 二塩化エタン, 二塩化エチレンとも呼ばれる) 100 に対し、Polyvinylformal (ポリビニルホルマールまたはホルムパールと呼ばれる)を重量比にして、0.5~3% 溶かした、多少トロリとした無色透明な溶液(レプリカ液という)で雪の結晶を形どる方法です。ちょうど、雪の結晶をプラスチックの薄膜で形どった蟬の抜殻のようなものです。

(a) レプリカ液の作り方

まずレプリカ液の作り方ですが、特に難しくはありませんが、いくつかの注意が必要です。最初の頃は国産のホルムパールに良いものがなく、アメリカから取り寄せたりもしましたが、現在では国産のもので十分で、最近使用したものは東京化成工業(株)の25g瓶です。これを五酸化リンをおいた恒温槽に入れ、50°Cで数日間おいて乾燥脱水すると良いのですが、-10°C前後の気温で用いる場合にはホルムパールに関しては、その必要もないでしょう。一方、二塩化エチレンの方は、手元にあるものでもカメレオン印(キシダ化学(株))、鹿印(関東化学(株))、犬印(小宗化学薬品(株))等と多種ありますが、メーカーによって水分を0.03%から0.1%程度含んでいるので、できるだけ水分の少ないものを選んだ方がよいでしょう。これを脱水するには、-20°C~-30°Cの低温下に数日間保って、含まれている水分を氷として析出させ、ガーゼで濾してとるのが良いでしょう。両者とも脱水した後、適当な密封できる瓶にまず二塩化エチレンを必要量だけ入れ、次にホルムパールの粉末を重量比にして0.5~3%の割合で入れ、密封してよく攪拌します。ホルムパールがよく溶けた時点で使用できます。ホルムパールを溶す操作も低温室内で行なうと、蒸気圧が低いので溶している間に再び水分の入るのを防いで理想的です。しかし、低温室のない時は室内で手際よくやれば十分です。つまり脱水に注意を払うことが必要な訳で、これがよく行なわれない場合には、低温でレプリカ液の中に水分が析出して白く濁ったり、作ったレプリカ液が汚くなる場合があります(小林, 1955)。溶媒として使った二塩化エチレンの融点は-35°Cですから、極地のような-40°C以下のところではレプリカ液が凍り使用できません。それで、同じ方法で溶媒の二塩化エチレンの代りにクロロホルムを使ったものも使われます。この融点は-65°Cですから十分使用にたえ、ホ

ルムパールとの重量比、および液の作り方は二塩化エチレンの場合とまったく同じです。ちなみに、ホルムパール25g瓶は500円、二塩化エチレン500g瓶は600円~800円で、理化学器械、化学薬品店等で容易に手に入ります。

普通の雪の結晶には1~3%のレプリカ液がよく、氷晶等のように小さな結晶には薄目の0.5%位が、大きな結晶には濃目の3%位のもので適当ですから、レプリカ液を作る時は、0.5%、1%、3%のものを同時に作ってラベルを貼って保存するのが良いでしょう。十分注意をし脱水して作ったつもりでも、使用中にレプリカ液が白濁することがあります。これはやはり溶けていた水分が氷として析出したものですから、この場合もガーゼで濾すとまた使うことができます。

(b) 雪の結晶のレプリカの作り方

観測を始める前に次のものを用意し、小屋なり雪洞の中に入れて十分外気になじませておきます。

- レプリカ液(100 c.c. 位)
- スライドガラス(26 mm×76 mm 標準型)
- プレパラートケース
- ガラス棒または箸(2~3本)
- スポイト
- ガーゼ(少量)
- 野帳、鉛筆(Bまたは2B)、シャープペンシル
- 黒い布を貼った板(10 cm×20 cm 位のもの)
- スライドガラスを覆うことのできる蓋(名刺のケースの蓋がよい)

レプリカ液は扱い易いように100 c.c. 位を広口瓶に入れ、スライドガラスはなるべく厚手のもので、多少高くとも白縁磨が良いでしょう。切りっぱなしのものだと、ガーゼで磨く時、手が冷え切っているので感覚が鈍り怪我をすることがあるからです。プレパラートケースはできたスライドガラスを保存するため、50枚入りの標準型で良いでしょう。

レプリカ液で雪の結晶のレプリカを作る方法は目的によっていくつかありますが、現に降っている雪の結晶の種類、大きさ、数などの記録を忠実にとるためには、次のような手順に従います。スライドガラスが温まらないように手袋をはくか冷たくして、ガーゼできれいに磨き、黒い板の上に置きます。ガラス棒にレプリカ液をつけ、その上に2~3滴たらし、ガラス棒を横にしてレプリカ液がむらにならないように一様に塗ります。でき上がったなら名刺ケースで蓋をします。左手に黒い板を、右

手で名刺ケースを押さえて戸外に出、頃合いをみて内側にかけた腕時計の秒針を確かめ蓋を取ります。雪の結晶が適当数ガラスの上に乗った段階で蓋をし、秒針を確かめて雪洞に戻ります。この場合ガラスの露出時間は、2秒、5秒、10秒単位が後の解析のためには都合が良いでしょう。ガラスの白縁のところに通し番号を記入し、ケースに収めます。野帳にも通し番号、日時、露出時間、目視による主な結晶形等、必要な事項を記入します。このようにしてできた樹枝状六花と角柱結晶の例が、第15図(a)、(b)に示されています。雪片のようにたくさんの結晶がかたまってガラスの上に落ちたり、あられのように塊状のものは下の方にしかレプリカ液がつかないもので、結晶の上の方はレプリカになりません。そんな時には、多目にレプリカ液を塗るか、その結晶の上だけに、ガラス棒でさらに1~2滴のレプリカ液を加えるか、スポイトで加えるかする必要があります。しかし大きな立体樹枝や雪片の場合は液をつける時収縮し、どうしても細い枝の一本一本までレプリカにすることはできません。

次に特にきれいな雪の結晶だけを集めてレプリカにしたい時は、黒い板の上にたくさんの結晶を捕集し、その中からこれぞと思う結晶を燐寸の軸を折って細くした軸先で釣り上げ、スライドガラス上に適当な間隔で並べ、ガラス棒につけたレプリカ液を1滴、結晶の上にとらします。このようにして作った例を第16図に示してあります。この場合、レプリカ液が多過ぎると結晶の周りに厚くレプリカ膜ができ、見苦しくなることがあります。またレプリカ液が少な過ぎると、結晶の上にとらす時、逆に結晶がガラス棒に付着して失敗することもあります。レプリカ液の量は結晶の大きさに応じて加減するときれいなレプリカができます。また、結晶は多少雲粒付で厚目の結晶の方がレプリカのでき具合が良く見えます。液が結晶を覆ったかどうかは、結晶の表面の色の変化、光り方の変化で判断できます。結晶が小さい場合には、どうしてもレプリカ液が多過ぎる傾向がありますので、そんな時は、レプリカ液を細い軸先に少しつけて黒い板に捕集した結晶の一つに軽く触れると結晶はレプリカ液のために軸先にくっつくから、それを静かにスライドガラスに乗せるのもよいでしょう。この時も、レプリカ液が多過ぎると軸先から離れなくなり失敗することがあります。この方法では、余分なレプリカ液がスライドガラス上に残らないので、うまくやると非常にきれいに作ることができます。

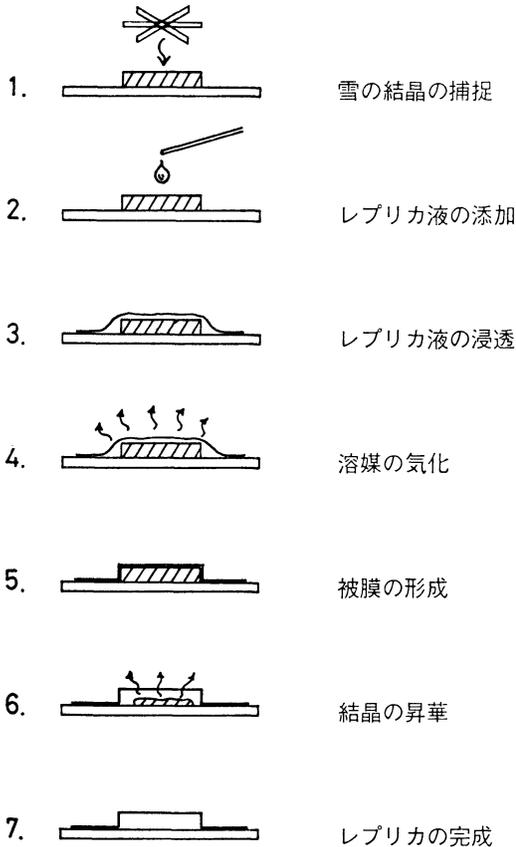
上に述べたような方法で、レプリカ液に覆われた結晶

は氷点下の乾いた空気中で、半日か1日おくと完成しますが、次のことにも注意して下さい。レプリカ液で処理した雪の結晶は、そのままにしておくゴミなどが付きますからプレバートケースや適当な空箱に保存しますが、この時ケースが少しでも傾いていると、レプリカ液が採ったサンプルごとケースの片側に流れてゆき、気付いた時にはスライドガラス上には何も残らないということがあります。ですからケースは常に水平に保ち、最初のうちは、時々ケースの蓋を明けて雪の結晶が間違いなくガラスの上に乗っているかどうか確かめる必要があります。ダイヤモンドダスト(細水)と言われる非常に小さな氷晶や、アイスフォッグ(水霧)の場合の氷晶は非常に小さく、そのため落下速度も遅いので、そんな小さな氷晶はスライドガラスの上になかなか落ちてきません。そのうちにレプリカ液の二塩化エチレンが蒸発してしまい、何度やっても氷晶のレプリカができないことがあります。そんな時は、レプリカ液を薄く塗ったスライドガラスの両側を親指と食指で挟み、氷晶の降って来る方向に向かって水平に10回から20回位振るとよくとれます。この時も氷晶がスライドガラス上に乗ったかどうかを顕微鏡で確かめ、レプリカ作成中に液と一緒に流れていないかどうか確かめる必要があります。

一方、塊状あられや紡錘状あられのレプリカはガラス板にくっついている面積が少ないので、保存用のケースを動かしたり、輸送の途中で離れてしまうことがあります。こんな結晶の場合には、ガラス板との接触点にレプリカ液を少し加えて補強すると良いでしょう。山などで採ったサンプルを持ち帰る場合には、ケースの中でスライドガラスが動かないように、毛ば立たない紙を何枚かに折ってケースの蓋との間に挟み、蓋もビニールテープ等で密封して持ち帰りましょう。また、余ったレプリカ液も、密封しておけば何年でも使うことができますから大切に保存しておきます。

レプリカ液が雪の結晶のレプリカを形成する過程は、第17図1~7のように考えられます。(1)気温になじんだきれいに磨いたスライドガラス上に雪の結晶を捕捉する(2)ガラス棒、箸等で1~2滴のレプリカ液を添加する(3)レプリカ液が雪の結晶に滲透する(4)レプリカ液の溶媒(二塩化エチレン)が蒸発する(5)溶質(ホルムバル)が雪の結晶を形どる(6)被膜を通して雪の結晶が昇華蒸発する(7)雪の結晶のレプリカが完成する。

雪の結晶がレプリカ被膜を通して昇華してゆく過程



第17図 雪の結晶のレプリカ形成過程

は、周縁部から昇華してゆくと同時に、平面の部分では、六角形のサーマル・エッチ・ピット(熱腐蝕孔)の形をとって昇華してゆくことが確かめられています(Muguruma・Higuchi, 1959)。

このような過程で完成したレプリカは、いくつかの秀れた点を持っていて、今日までの雪の結晶に関する実験、観測に多く利用され、また貢献し、この方面の研究が非常に進んだことは事実です。レプリカ法が発表された頃は、種々失敗もあったようですが、最近では細かな注意も行き届いてほとんど失敗はなくなりました。雪の結晶のレプリカ法は、再現性の良いことがまず上げられます。雪の結晶の外形はもちろんのこと、細かい表面構造や立体構造も記録しているので、研究室に戻ってからゆっくり常温の部屋で顕微鏡観察ができます。第15図(c), (d)は、(a), (b)の矢印の部分を顕微鏡撮影したものです。この時点ではもう雪の結晶はレプリカにされており、融解することも昇華することもありませんか

ら、1枚のスライドガラスも十分時間をかけ、精査することができます。レプリカはまた、保存性にも秀れています。ゴミのつかないように保存すれば、また操作の時にレプリカの表面に機械的な力を加えない限り、半永久的に保存でき、いつでもその場で見るすることができます。また、現に降っている雪の結晶を忠実に記録しようとして採ったレプリカは、顕微鏡観察と違って人為的な選択が入っていないので、降雪強度や結晶形の時間的変動を見るのに都合がいいし、また奇形雪結晶が何%位含まれているとか、いつ頃降り始めたといった、その観測時点で気付かなかったことを、逆のぼって見られる点も強みです。

全部のレプリカの時間的経過を見たいとか、レプリカガラスの破損を恐れてコピーを作りたい場合は、レプリカガラスの密着写真が考えられますが、少し倍率が足りないので、手札判かキャビネ判位に引き伸すと良いでしょう。引き伸す方法は、普通の写真の場合と同様に、引伸機のネガを入れるところにレプリカガラスを入れて引き伸ばせば良いのですが、ガラスの出し入れの際、レプリカをはがしたり傷つけたりすることがあるので注意が必要です。

スライドガラスに採ったレプリカは、そのまま普通のスライドプロジェクターにかけて、スクリーンや襖に大きく拡大し、たくさんの人に見せることもできます。あまり気にも止めていなかったあの1mm足らずの雪の結晶が、数百倍の大きさに拡大されてスクリーン上に見せられた時の驚ろきはきっと忘れられないでしょう。

4.4 レプリカ法を利用した観測法

レプリカ法を降雪や室内実験での氷晶のサンプリングに使用した例は数限りなく、今日では、その簡便さから降雪の観測には顕微鏡よりもむしろこの方法が必ず採用されていると言っても過言ではありません。ここでは観測の2~3の例を紹介します。

遠藤・秋山(1970)は、メソスケールの降雪域が地形による風とどのような対応があるかを調べるために、北海道小樽市南部の約5km×5kmの地域に住む高校1年生500名にそれぞれ2c.c.のレプリカ液をアンプルに充填し、スライドガラスと一緒に配布し、季節風下の降雪の同時観測を遂行しました。このように、レプリカ法は同時に数百点の観測も可能なので、細かな議論ができます。また、Kikuchi・Yanai(1971)は昭和基地-南極点往復調査旅行の際、82°20'S, 82°48'S, 南極点の3ヶ所で捕集されたレプリカの解析を行ない、軸比(c/a)

が10以上の長い角柱や、奇形雪結晶を見出しました。また、南極点での1ヶ月にわたる観測(Kikuchi・Hogan, 1978)。にも0.5%のレプリカ液は有効であったし、航空機を用いた雲内のサンプリングから水晶の Growth Mode を議論することも可能です(Ono, 1970)。

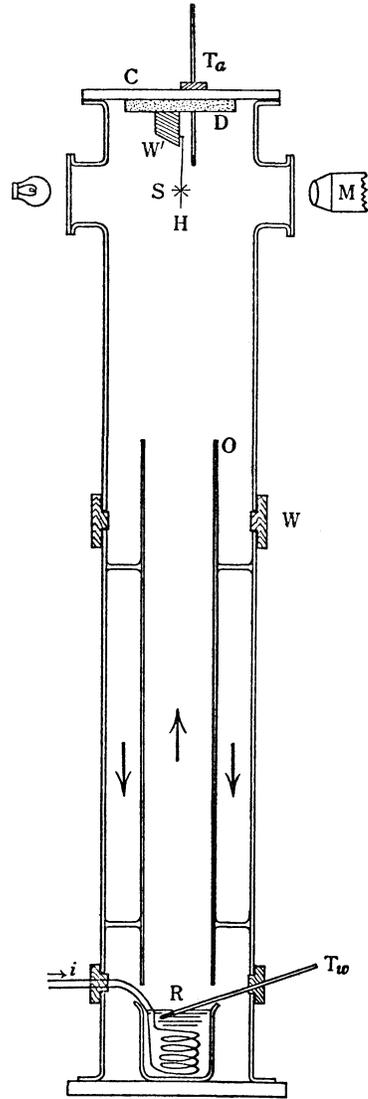
4.5 その他の方法を用いた観察

その他、比較的簡単な観測方法として、顕微鏡投影や影写真法(樋口, 1954, 1962)等がありますが、現在はあまり用いられていません。

5. 人工雪の作り方

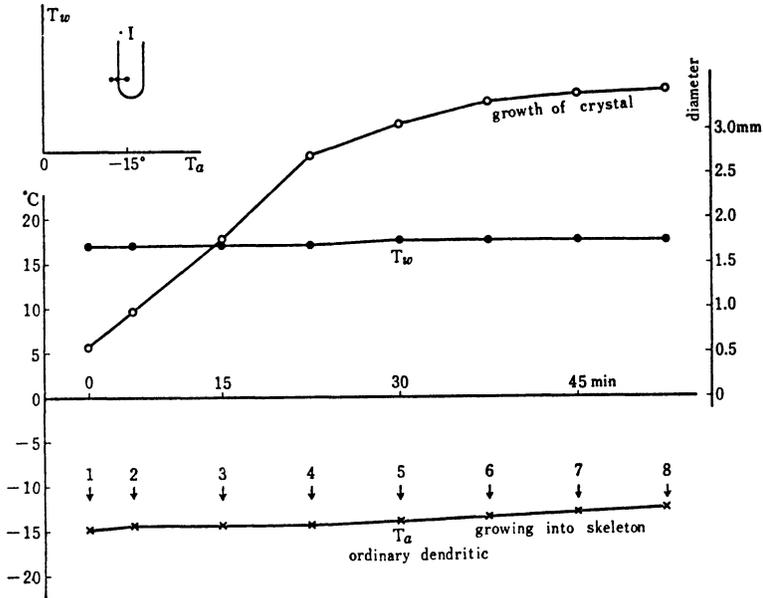
さて、雪の結晶の分類もでき、観察の仕方もマスターしたところで、これらの雪を実験室で作ってみましょう。

雪の結晶をいろいろな温度、湿度の条件下で最初に人工的に作ったのは、中谷宇吉郎(中谷, 1949; Nakaya, 1954)ですが、その装置の概略は、第18図に示すように、直径8cmの太いガラス管の真中に直径4cmのガラス管を入れ、垂直に立てて細いガラス管で継ぎ、その下に水を入れたビーカー(R)が置いてあります。ビーカーの水の温度(T_w)は電流を加減して任意の温度に保てるようになっており、装置の上部には平面ガラスを貼った照明用と観測用の窓があります。天井は金属板(C)の裏に木板またはコルク板(D)を貼りつけ、それにコルクの楔(W')を取り付け、これから雪の結晶(S)を成長させる兎の毛(H)を吊るし、水平顕微鏡(M)で観察します。この装置を低温室内に置くと、ビーカーから蒸発する暖かい空気は内側のガラス管(O)を通して上昇し、外側から冷えるために2本のガラス管の間の空気が下降するといった水蒸気の対流を、なるべく定常的にするように注意が払われています。雪の結晶(S)ができる位置の気温(T_a)、ビーカーの水温(T_w)と低温室の室温(T_r)をそれぞれ測定します。 T_a と T_w を変えることにより、いろいろな雪の結晶がHの上に成長します。樹枝状六花が兎の毛の上に成長してゆく条件と過程が、第19, 20図に示されています。雪の結晶を成長させる糸は何でもよいように思われますが、実際にはそうではなく、兎の腹毛の乾燥したものが一番良いのです。兎の毛を顕微鏡で調べてみると、ところどころに小さな瘤があり、これが雪の核(氷晶核)の役割を果たすからで、その他の糸ではビーカーからの水蒸気が糸の全長に凝結し凍結すると、それから太い毛虫のような霜が延びて、きれいな雪の結晶を作ることができません。きれいな雪の結晶を作るためには、毛の上の核の間隔が大切なのです。

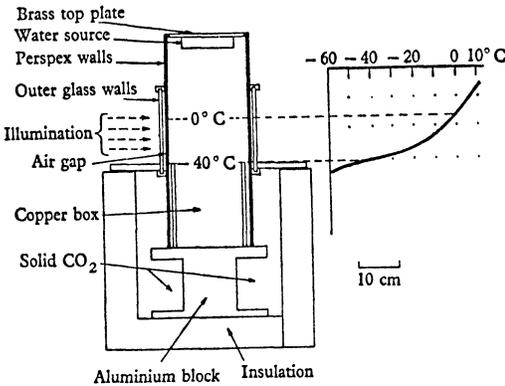


第18図 中谷(1949, 1954)の人工雪装置(対流型)。

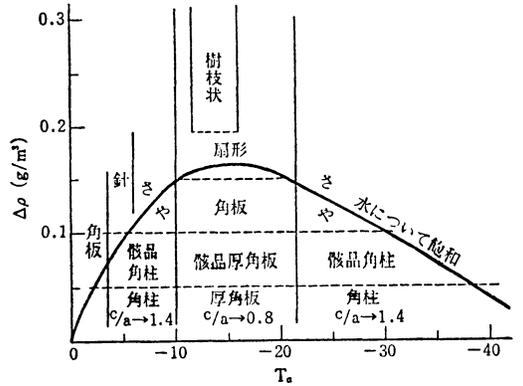
中谷の装置が水蒸気の対流型であったのに対して、水蒸気源を装置の上に置き、拡散で水蒸気を補給する拡散型の装置で雪を作ったのは Hallett・Mason (1958) です。直径20cm、高さ60cmの拡散箱を下からドライアイスで冷却することにより、拡散箱の中に一度に室温から -60°C までの温度傾度を作ることができ(第21図)、垂直に張った細いナイロン繊維の上に、 0°C から -40°C までの温度に相当した雪の結晶が成長するのです(第22図)。



第19図 中谷の人工雪装置によって作られた樹枝状六花の成長過程と温度曲線。



第21図 Hallett・Mason (1958) の人工雪装置 (拡散型)。



第23図 雪の結晶習性を表わす小林の $T_a-\Delta\rho$ ダイアグラム (Kobayashi, 1961)。

このように雪の結晶は、温度と湿度を変えることによっていろいろな形をとることが分かり、「雪は天から送られた手紙である」という有名な言葉が中谷によって残されましたが、最近の Kobayashi (1961) の実験により、雪の結晶習性は温度 (T_a) を横軸に、水蒸気の過飽和量 ($\Delta\rho$) を縦軸にとる方が良いことが分かりました (第23図)。雪の結晶がまず角柱状に伸びるか、角板状に成長するかは温度 (T_a) によって決まります。つまり、 $0^\circ\text{C} \sim -4^\circ\text{C}$ (角板状)、 $-4^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ (角柱状)、

$-10^\circ\text{C} \sim -21^\circ\text{C}$ (角板状)、 $-21^\circ\text{C} \sim -40^\circ\text{C}$ (角柱状) となり、次に水蒸気の過飽和量 ($\Delta\rho$) が大きくなるにつれて、成長の型は、たとえば -15°C の角板成長の領域では、厚角板→骸晶厚角板→角板→扇形→樹枝状六花と変わり、また -6°C の角柱成長の領域では角柱→骸晶角柱→さや状→針状結晶と変化するのです。

最近の人工雪の生成は、熱電素子対で組み立てた小さな拡散型低温箱を使って、 -90°C での氷晶の成長(Kobayashi, 1965)、自由落下中に雪の結晶を成長させるため

に、高さ15mの大型低温塔を使うといった試みがなされています (Yamashita, 1971)。しかし、これらの装置はいずれも特殊であり、誰もができるといえるものではありません。目的にもよりますが、低温室やフリーザーの中にかくさんの氷晶を作ることはさほど難しいことではありません。-20°C以下の温度に保たれたフリーザーにアトマイザーで直径数十μmの霧粒を作った後、沃化銀の煙や、ドライアイス等で冷した金属棒で種播きをしてやると、すぐに氷晶が発生し、10分後にはフリーザーの底にゆっくりと落下します。この状態に、懐中電燈の光を当てるとキラキラと輝いて、正しくダイヤモンド・ダストを思わせます。フリーザーの底にスライドガラスを置いて落下してきた氷晶を捕集し、顕微鏡写真に撮ったものが第24図です。もちろん、レプリカ液を使って捕集しても良いのですが、結晶は小さくて可愛らしく、雪の華のお菓子を思わせます。このような方法でも氷晶は容易に作るができます。

6. おわりに

雪の結晶の観察について、その方法、記録のとり方といったことを中心にして、現在使われているもの、また誰もが比較的簡単に使えるものを、そしてこの冬からでもすぐ応用できるように詳しく述べたつもりです。

ここでは、われわれが一人ででもできる範囲の観察・観測法しか紹介しませんが、雲中での雪の結晶を航空機でそのまま観測するために、Cannon (1970, 1975) はフラッシュ光源を使う方法を考え、後にCarrera (1976) によってほぼ完成されているし、また、Knollenberg (1970, 1976) は雪の結晶にレーザー光線をあて、ファイバーカメラで映像化する方法を考案し、現在では既に商品化されて、航空機にセットされ、お声がかかればどこにでも出かけて観測できるまでになってきています。このような航空機を使っての大きかりなものは大きかりなものとして、また一方、どんな小さな簡単な観察でも、まずやってみないことには全てが始まらないので、億劫がらずにやってみることが必要でしょう。

文献

- Bentley, W.A. and W.J. Humphreys, 1931: Snow Crystals, Dover Pub. Inc., 226 pp.
 Carrera, N.J., 1976: Snow crystals photographed in situ in winter storms, Preprints. Int. Conf. Cloud Physics, 1976, Boulder, 85-90.
 Cannon, T.W., 1970: High-speed photography of airborne atmospheric particles, J. Appl. Met.,

- 9, 104-108.
 Cannon, T.W., 1975: A photographic technique for measurement of atmospheric particles in situ from aircraft, J. Appl. Met., 14, 1383-1388.
 遠藤辰雄, 秋山敏弘, 1970: メソスケール降雪域に及ぼす地形による風の影響, 天気, 17, 429-433.
 Hallett, J. and B.J. Mason, 1958: The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour, Proc. Roy. Soc., A247, 440-453.
 Harimaya, T., 1977: The internal structure and embryo of graupel, J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, 5, 29-38.
 樋口敬二, 1954: 降雪の結晶形, 大きさ, 質量の同時観測の方法について, J. Met. Soc. Japan, 32, 77-82.
 ———, 1959: 雪の結晶の水平分布について (序報), 天気, 6, 186-189.
 ———, 1962: 雪の結晶の観察と記録, 気象研究ノート, 13, 45-58.
 Higuchi, K., 1962: Horizontal distribution of snow crystals during the snowfall (II), J. Met. Soc. Japan, 40, 73-82.
 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.
 ——— and ———, 1978: Properties of diamond dust type ice crystals observed in summer season at Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica, (投稿中).
 ——— 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 (ed. C. Magono), 4-27.
 Kinoshita, S. and G. Wakahama, 1960: Thin sections of deposited snow made by the use of aniline, Contr. Inst. Low Temp. Sci., Hokkaido Univ., 15, 34-45.
 Knollenberg, P.G., 1970: The optical array: an alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination, J. Appl. Met., 9, 86-103.
 Knollenberg, P.G., 1976: Three new instruments for cloud physics measurements, Preprints. Int. Conf. Cloud Physics, 1976, Boulder, 554-561.
 小林禎作, 1955: レプリカ溶液についての2, 3の注意, 天気, 2, 267-272.
 ———, 1969: 雪の結晶の二色光源による顕微鏡写真撮影法, 低温科学, 物理篇, 27, 395-397.
 ———, 1970: 雪の結晶, 講談社, 304 pp.
 Kobayashi, T., 1961: The growth of snow crystals at low supersaturations, Phil. Mag., 6, 1363-

- 1370.
- Kobayashi, T., 1965: Vapour growth of ice crystal between -40 and -90°C , *J. Met. Soc. Japan*, **43**, 359-367.
- Magono, C. and colleagues, 1959: Preliminary investigation on the growth of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, **1**, 195-211.
- and colleagues, 1960: Investigation on the growth and distribution of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically, II. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, **1**, 267-282.
- and C.W. Lee, 1966: Meteorological classification of natural snow crystals, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, **2**, 321-335.
- and S. Suzuki, 1967: A study on crystal axes of snow crystals with complicated shapes, utilizing a polarization microscope, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. VII, **3**, 27-35.
- and S. Tazawa, 1966: Design of "Snow Crystal Sondes", *J. Atmos. Sci.*, **23**, 618-625.
- Mason, B.J., 1971: *The Physics of Clouds*, Clarendon Press, 671 pp.
- Muguruma, J. and K. Higuchi, 1959: On the etch pits of snow crystals, *J. Met. Soc. Japan*, **37**, 71-75.
- 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 岩波書店, 480 pp.
- Nakaya, U., 1951: The formation of ice crystals, *Compendium of Meteorology*, Amer. Met. Soc., 207-220.
- , 1954: *Snow Crystals, natural and artificial*, Harvard Univ. Press., 510 pp.
- and K. Higuchi, 1960: Horizontal distribution of snow crystals during the snowfall, *Physics of Precipitation*, Geophys. Mono. No. 5, American Geophys. Union, 118-129.
- Ono, A., 1970: Growth mode of ice crystals in natural clouds, *J. Atmos. Sci.*, **27**, 649-658.
- Schaefer, V.J., 1941: A method for making snowflake replicas, *Science*, **93**, 339-340.
- , 1942: Use of snowflake replicas for studying winter storms, *Nature*, **149**, 81.
- 坪井誠太郎, 1959: 偏光顕微鏡, 岩波書店, 293 pp.
- Yamashita, A., 1971: Skeleton ice crystals of non-hexagonal shape grown in free fall, *J. Met. Soc. Japan*, **49**, 215-231.
- 吉田六郎, 1960: "雪の結晶", 16ミリカラー映画, 東映教育映画部.