

2. 雪は「天からの手紙」か？

北海道教育大学 岩見沢校 油川 英明

1. はじめに

雪の結晶は、大きさがわずか数ミリほどの繊細な氷の結晶で、ふたつと同じものがないといわれるほど千差万別の形をしており、このことはまた、多くの謎を秘めていることの象徴でもあるかのように思われる。そして、雪の結晶は自然の至芸とも言えるもので、遠い昔より人々の興味を引いてきた。時には風流物として、またある時には博物学の対象としていろいろに語りつがれ、科学的な調査・研究も行われてきた。このなかで、中谷宇吉郎は、自らの研究を集約し、それを簡潔に、かつ印象的に表現した言葉として「雪は天から送られた手紙である」という名言を残した。このようなことから、今回の小講義は「雪は『天からの手紙』か？」と題して、中谷の言葉が語りかけることをひもときながら、私個人の瑣細な実験をもとに、雪の結晶の生成について新たな知見を紹介しようとするものである。ただ、この知見は研究半ばのものであることをここにお断りする次第である。

2. 「天からの手紙」と雪結晶の形態

中谷(1949)は、天然の雪結晶を観察し、そのほとんどの形のものを人工的に作製することに成功したことから、雪結晶の形を見れば、実験の結果から、その生成条件、つまりは温度と湿度が分かるとして、雪の形は上空の気象を知らせてくれる便りという比喻により、「雪は天から送られた手紙である」という言葉を記した。この名言は雪の科学に限りなくロマンを与えるものであるが、ここでは中谷のそのような意図から少し離れて、「天からの手紙」たりえるかどうかということ、やや醒めた目で眺めてみることにする。

中谷の雪の研究は、先ず天然雪の観察からはじめられているので、我々も同じように雪結晶の実体を見ることから出発しよう。雪は、中谷が述べているように(1949)、平均としての径が3mm、厚さが10 μ m、質量が0.05mgの氷の微細な結晶で、基本の形は六角形の板状と柱状の二種である。これらが単独であったり、あるいは組み合わせの形で降ってくる。板状のものは柱状のものに比べて形が複雑で種類も多い。雪の結晶は二つと同じものがないと言われるように、上空からの結晶を次から次へと顕微鏡で写真撮影してみても、すべてが異なっている。それを始めてグループ分けして、体系的な雪結晶の分類表(図1)を作成したのが中谷である(1949)。現在は、中谷の分類表をもとに、そのおよそ2倍の80種類ほどに分類されている。

板状の結晶は当初、一枚の板のように考えられていたが、基本の構造は二重で(図2)、なかには数段に重なった形態のものも見られる。結晶の中心には小さな六角柱があり、一般にはそのうちのどちらかの底面が大きく成長して板状結晶になっている(Iwai, 1983)。これを真上からみれば、中心に小さな六角形を据えた一枚の板状に見えるわけである。この中心部の六角柱(必ずしも角柱状になっていない場合もある)が少し長ければ、上下の六角形の面から競合することなく結晶が成長し、はっきりとした二重の構造になり、図2に示されたような鼓型の結晶になる。また、中心部の小さな角柱から板状の枝が成長する際、その上下の面でどちらかの枝が優先的に伸びる場合があり、そのときは、例えば上の面から3本の枝が伸びれば、下の面からは3本、上が2本なら下は4本というように、合計が6本になるような成長をする。これを真上からみれば、平板状の六花に見えるが、実は二段になっ

ているわけである。さらに、これらの枝は、結晶の内側に向いた面には特有なレリーフ文様ができており、外側に向いた面には文様がなく平坦になっている。柱状結晶も、中空の結晶などの内側には凹凸があるが、外側は比較的平坦になっている。つまり、雪結晶はレリーフ文様のある「裏」と平坦な「表」を持っているわけである（油川，1992）。このような雪結晶の裏・表の成因について、中谷（1949）は人工雪の断面の観察から、結晶を成長させる水蒸気量が枝の両面で異なるからではないかと述べているが、実際の雪結晶の裏・表が水蒸気の供給方向には関係していないと見なされることから（油川，1992），このような結晶形態は雪結晶が水蒸気から昇華成長することによって少し疑問を抱かせるものである。

雪結晶は一般には六花であるが、それ以外にも二花や三花などの枝数の少ないもの、あるいは奇形としての七花や、12本の枝が成長した十二花結晶（中谷，1949），さらには十八花結晶（Kikuchi and Ueda, 1987）などが知られている。枝数が六花より少ない結晶は、落下中に六花が分離したものであると考えられおり（中谷，1949），また、十二花及び十八花結晶については六花を基本にした「雪片説」（中谷，1949）や「双晶説」（Kobayashi and Furukawa, 1975）を基に考えられてきているが、それらの成因は完全に解明されているわけではない。

雪結晶の内部には気泡、あるいはその連なった形のものが見られる場合がある。一般に、氷結晶が成長する際に気泡が生成するのは水に溶存している空気の析出によるわけであるが、雪結晶の内部に存在する気泡については水蒸気の昇華による不均一な結晶成長にその成因が求められており（前野・黒岩，1966），同じ氷結晶として成長の整合性が示されないままに留められている。さらに、板状の雪結晶の枝が接合して一体化する形態や、結晶の中心部に円形の文様が見られること、あるいは種々の奇形結晶の形成など、これらの成因を追い求めるとき、先の気泡の問題と同様、それは決まって雪結晶の気相成長説（後述）に突き当たり、前進が滞ってしまう。

3. 過去の雪の観察

雪の結晶が六花状であることの最古の記録は、紀元前150年頃の中国・前漢時代の韓嬰による「韓詩外伝」に記された「凡草木花多五出雪花独六出」とされている。それが我が国には9世紀末に伝わり、雪を「六出」と記すようになったようである。韓嬰は燕の人で、その都は現在の北京である。なお、現存する「韓詩外伝」には「六出」と記載された箇所は失われて見あたらない。唐代（618-907）初期の「藝文類聚」に「韓詩外傳曰凡草木花多五出雪花独六出雪花曰霰雪雲曰同雲」とあり、また宋代（960

I 針状結晶	1. 単針		IV 平板角柱	1. 鼓型		
	2. 針組合せ			2. 平板付砲弾型		
II 角柱状結晶	1. 単角柱		V	3. 粉雪		
	2. 角柱組合せ			側面結晶		
III 板状結晶	1. 正規六花		VI 環状付結晶	1. 環状付各種		
				2. 厚板		
	2. 三花四花等			3. 霰状雪		
				4. 霰		
	3. 十二花			VII 無定形	1. 氷片状	
	4. 畸型				2. 水滴付	
5. 立体六花		3. 其他	各種			
6. 放射型						

図1 中谷（1949）の雪結晶の分類

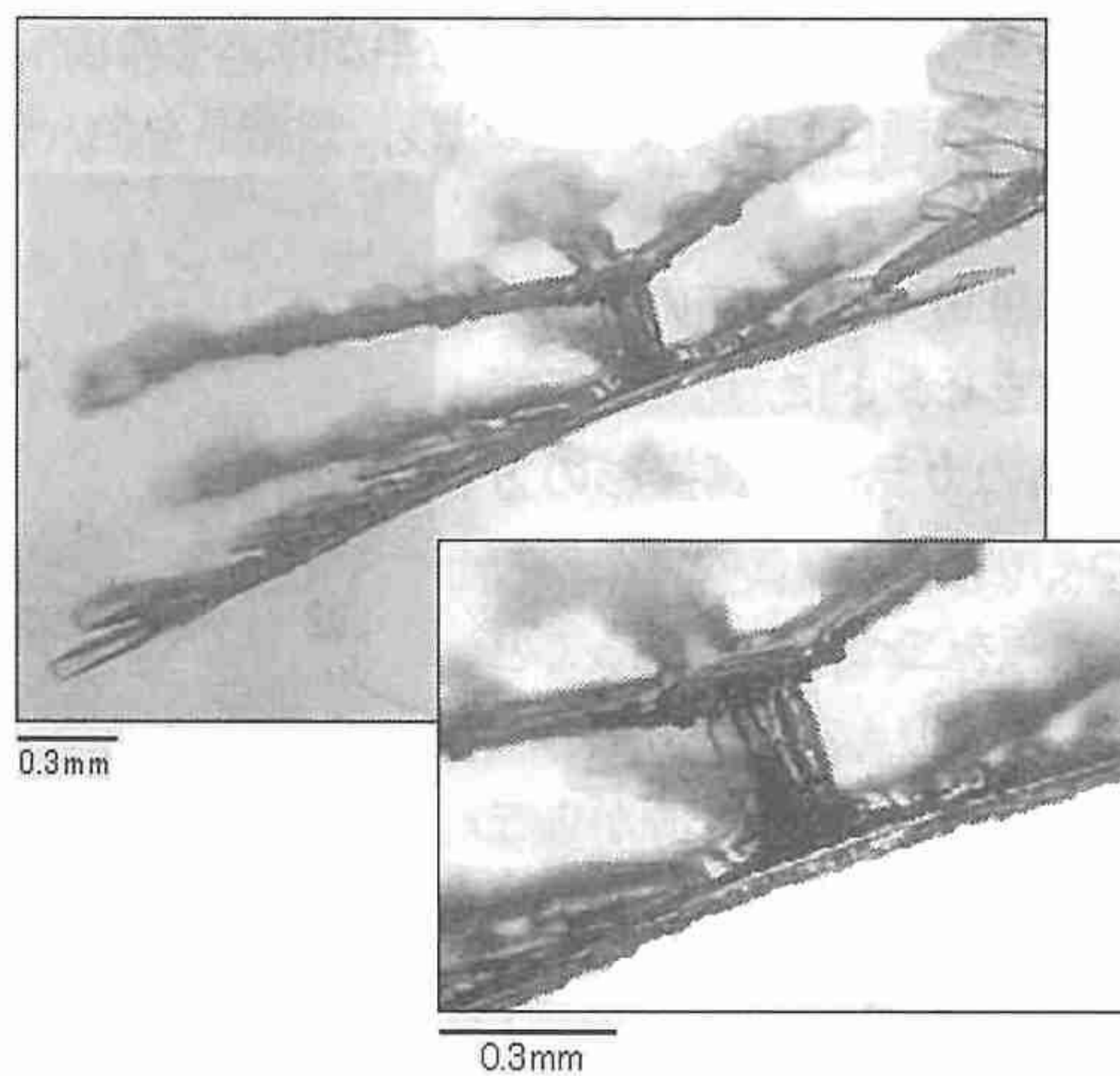


図2 雪結晶の断面

—1279) 初期に編纂された太平御覧にも「韓詩外傳曰凡草木花多五出雪花独六出雪花曰霰」とある。わが国に「六出」ということが宇多天皇(887—896)の時代に伝来したとすれば、それは「藝文類聚」によるものと推察される。

西洋では13世紀中葉から肉眼により雪の観察が行われていたとされるが、その形を描いた最古のものは1555年におけるウプサラ(スウェーデン)の大僧正オラウス・マグヌスのスケッチである。これは、結晶の形を示しているとは言い難いが、雪にはいろいろな形のものがあるということを描いた点においては注目される。

その後、ケプラー(独)やデカルト(仏)などが雪の観察やスケッチ、あるいは六角形についての考察などを行っており、1893年にはノイハウス(独)が初めて雪結晶の顕微鏡写真を撮影している。そして、1931年にはベントレー(米)の写真集(Bentley and Humphreys, 1931)が出版された。ベントレーは1865年、米国バーモント州のジェリコの農家に生まれ、ほとんど母親の教育で育ち、17才のときにカメラを購入してもらい、雪結晶の顕微鏡写真撮影を始めた。撮影の多くは納屋で行われ、その枚数は5400枚ほどとも言われているが、そのうちの2453枚が写真集“Snow Crystals”として米国気象学会の援助により出版された。ベントレーは、当時としては高価な(乳牛10頭分以上とも)カメラを操作し、その写真は、暗視野のなかに雪結晶だけが白く写し出されるように加工している。この例を図3に示す。

我が国には雪の文様として雪華(結晶)文様のほかに雪輪文様が知られているが、これは、前述のように、雪が「六出」という中国からの伝来知識と、京や江戸での降雪はたくさんの結晶が絡み合った「雪片」として降り、多くは丸い塊で見えることから、雪を円形(雪片)でかつ六出(六つの窪み)になるように描いたものではないかと想像される。一方、雪華文様は、天保年間の土井利位の「雪華図説」によるもので、当時の江戸においても“大炊文様”として流行したことが伝えられている(小林, 1982)。我が国における雪の結晶の観察は、本草学者の小野蘭山(1729~1810)がその著書に記したことに始まり、洋画家の司馬江漢(1738~1818)が顕微鏡で観察した雪のスケッチを銅版画に描き、これが我が国で最初に描かれた雪の結晶であると言われている。

4. 雪結晶の顕微鏡写真撮影法

ベントレーの写真に感銘を受けた中谷は、1932年に雪の研究に着手した。中谷は当初、ベントレーのような黒地に白く浮き上がる結晶の写真撮影を試みた。それは、ウルトロパーク顕微鏡という反射照明型顕微鏡による撮影であったが、この顕微鏡写真について中谷は、雪結晶の微細な構造が余り鮮明に撮影されないとして、以後は透過の斜光照明による撮影を主に行っている。

その後、雪結晶の撮影はカラーによっても行われるようになった。その始まりとして、吉田六郎は中谷の指導のもとに、雪結晶のカラー映画撮影を手がけ、その後、「1光源2色照明法」による雪結晶の顕微鏡写真撮影法をつくりあげた(樋口, 1962)。これ以後、雪結晶を白、背景を青として撮影する方法は、吉田の方法に倣っていると言える。

小林(1969)は、吉田の照明方法の原理をヒントに、比較的手軽に雪結晶のカラー写真撮影の方法をつくりだした。この方法の特徴は、光源を二つ用いていることである。つまり、吉田の方法の困難なところは、一つの光源から二

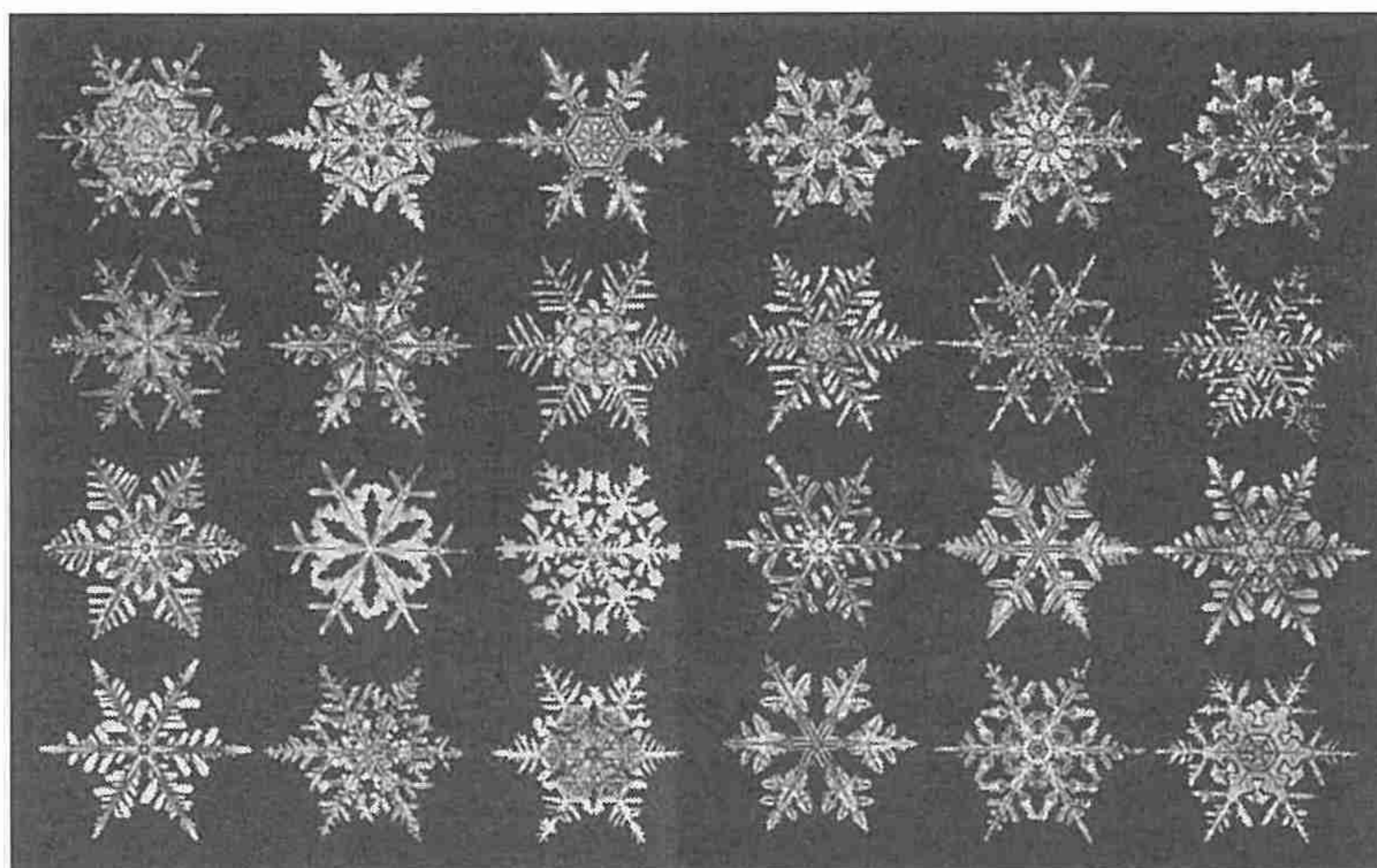


図3 ベントレー(1931)の雪結晶の写真(写真集の見開き2頁分)

色の照明を得ることであるから、それを個別の光源にしたわけである。

さらに幾つかの撮影法が考案されてきたが、ここでは照明器具のなかにフィルターを包み込んだ、いわゆる内包型フィルター式撮影法（油川，2005a）について述べる。この方法は、凹面鏡を照明用の器具として使用した一般の顕微鏡に、簡易フィルターを用いるだけの簡単なものである。すなわち、図4に示したように、顕微鏡の光源から発した白色光は照明用の凹面鏡により反射されて試料を照射するわけであるが、このとき顕微鏡により観察される範囲は、通常、対物レンズの開口角によって決められる。つまり、凹面鏡からの光はこの開口角の部分だけが対物レンズに入射するわけで、この領域をフィルターで覆えば、顕微鏡の視野にはそのフィルターを透過した光線のみが入射し、また、フィルターの代わりに光線を遮断する円板を挿入すれば、対物レンズには光が直接入射せず、顕微鏡は暗視野の状態になる。そして、載物台に雪結晶があれば、凹面鏡による対物レンズ視野外の斜光が結晶を照射し、反射・屈折を生じる。その光のうち、対物レンズの開口角以内のものは顕微鏡に入射し、白色光の結晶像を結ぶことになる。このようにして、フィルターの色を背景にして雪結晶だけが白く写し出される写真を撮影することができる。その顕微鏡写真の例を図5に示す（実際は青色の背景）。

5. 人工雪の作製法

5-1 中谷の人工雪作製法

中谷は、雪結晶のいろいろな形を観察し、これらがどのようにして成長するのかを探り当てるために、雪を人工的に作製する実験を始めた。実験は先ず、霜の結晶を作製することからはじめられ、そこから「空間に霜の結晶をつくる」という発想で、ウサギの毛を空中に吊した対流型装置が考案され（図6）、人の手で初めて雪の結晶をつくるという、いわゆる人工雪の作製に成功した。時に1936年3月12日であった。ここから、新たに雪の実験的研究が開始された。そして、天然雪と人工雪の研究を集大成したものとして、1949年に「雪の研究」が出版され、1954年には米国のハーバード大学から、新たに「中谷ダイヤグラム」などが加筆され、「Snow Crystals - Natural and Artificial -」が出版された。

中谷は、人工雪の実験結果から、雪の多様な形は温度と水蒸気量、この場合は過飽和水蒸気量であるが、それらによって決められるという結論を導いた。そして、それを図表にまとめ、いわゆる「中谷ダイヤグラム」（Nakaya, 1954）が示された（図7）。この中谷ダイヤグラムによれば、板状結晶、例えば樹枝状結晶は、温度が -14°C ～ -17°C の範囲で、湿度が約108%（氷の表面に対して）以上において成長する。また、 -10°C よりも高い温度、あるいは -20°C よりも低い温度の領域では、柱状の針や角柱などの結晶が成長する。そして、湿度が増加すると結晶の基本の形はそのままに、形態が複雑に変化して行く。このような実験的研究から、中谷は「雪の研究」の緒言に、「雪は低温に於いて水蒸気が或る種の核に昇華作用によって凝縮した氷の結晶である」と記している。この気相成長説は雪結晶の研究の「前提」となり、今日に至っている。

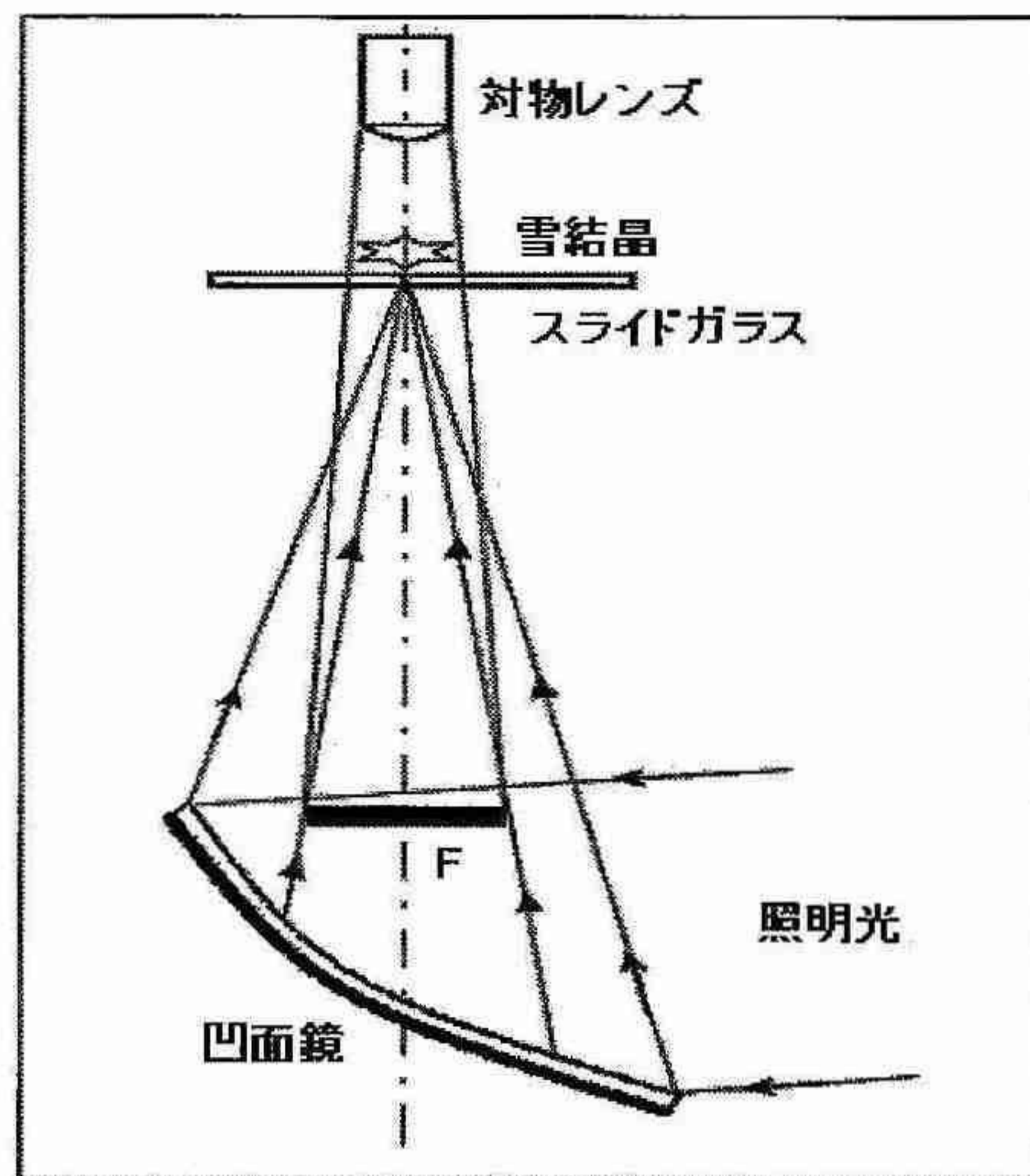


図4 内包型フィルター式撮影法の原理

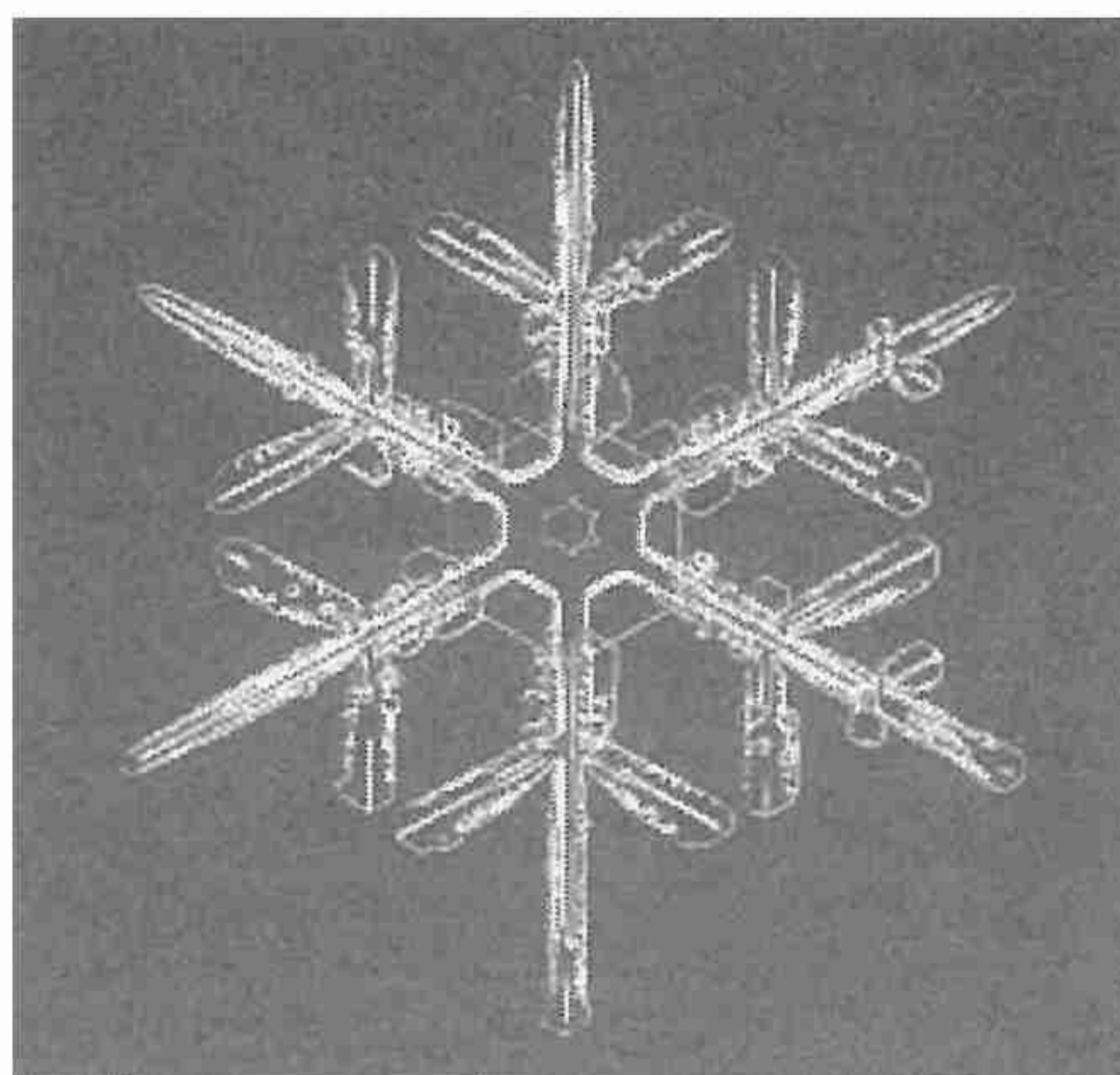


図5 内包型フィルター式による撮影例

中谷ダイヤグラムは、雪結晶の成長を示す国際的な標準図となっており、その内容は大略、次の通りである。1) 雪結晶の形態は温度と湿度(氷飽和以上)によって決定される、2) ほとんどの雪結晶は水飽和を超えた過飽和領域で形成される(図7のWは水飽和の曲線)、3) 雪結晶の基本的な形状(柱状か板状か)は温度によって決まり、温度の低い方へ向かって柱状、板状、柱状と繰り返す、4) 一つの温度には一つの形状(柱状か板状)が対応し、同一温度で二つの形状のものが形成されることはない、5) 雪結晶が形成される湿度には上限があり、その値は140%(氷に対して)で、これを超えると雪結晶には氷の細粒が形成される、ということである。

5-2 その後の人工雪作製法

中谷が水蒸気対流型の人工雪作製装置を開発した後、水蒸気の供給方法や冷却方法にいろいろと工夫が施された装置が考案されてきた。それらを列挙すると次のようになる。

Hallett and Mason (1958) による拡散型装置は、水分補給源を上方に設置して下方をドライアイスで冷却し、水蒸気を上方から下方へ拡散させることにより雪結晶を成長させるというもので、実験は300%ほどの高過飽和度領域まで行われている。このとき、繊維を上下方向に取り付ければ、主には各箇所の温度に応じたいろいろな種類の雪結晶を一度に成長させることができる。また、Kobayashi (1960) は対流型装置を常温式に改良して、中谷の人工雪の追試を行っている。最近では、平松式(平松, 1997) のペットボトルを利用したものや、兎毛の代わりにタンポポの綿毛を用いたもの(香川他, 2003)、あるいは冷却にペルチェ素子を用いた装置(村井, 2005) などが開発されている。なお、人工雪作製の教材や降雪装置も一般に市販されている。

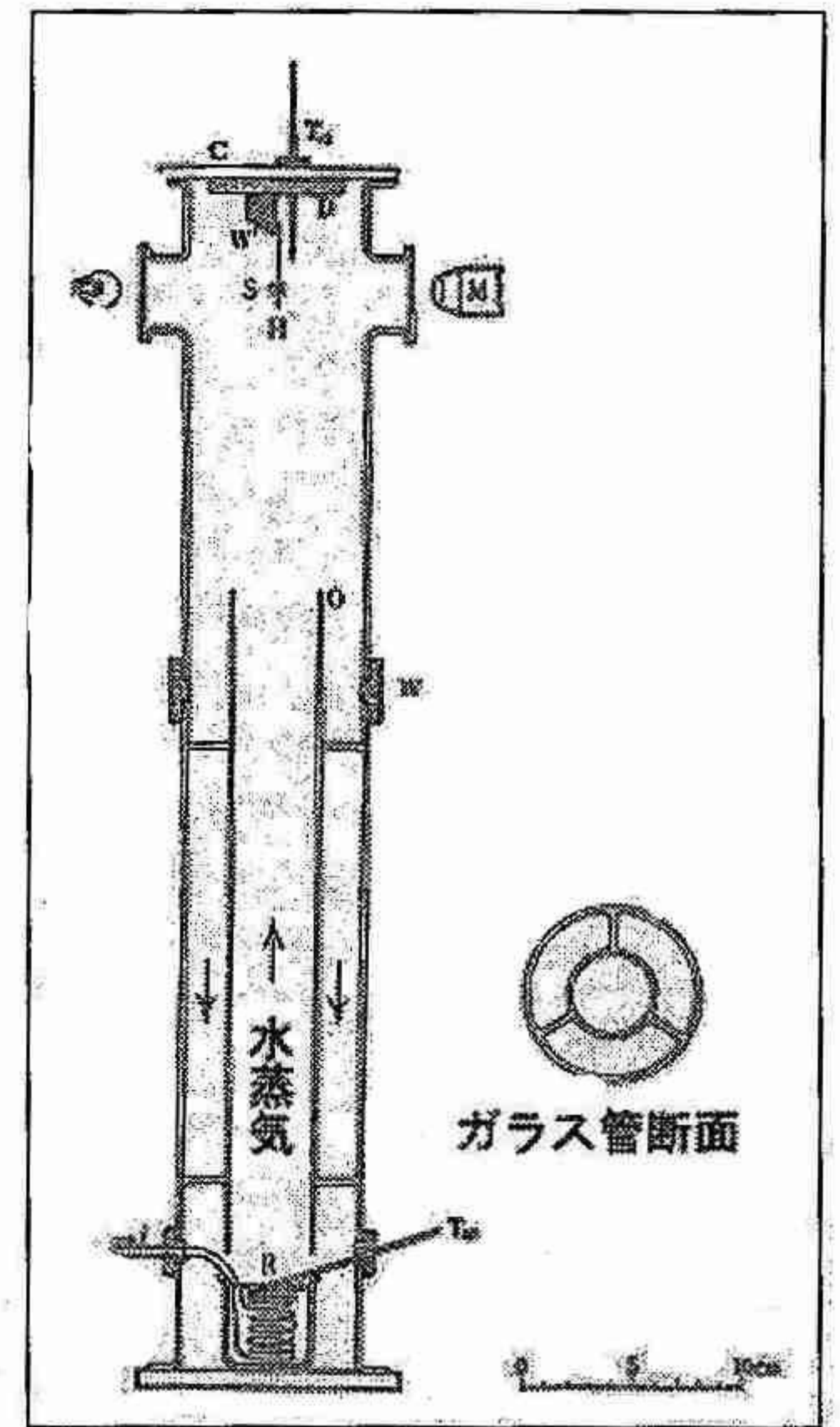


図6 中谷の人工雪作製装置

6. 人工雪の「謎」

天然の現象から人工雪の生成条件をみると、幾つかの「謎」に突き当たる。第一の謎は、雪結晶の成長に関わる水蒸気量についてである。中谷ダイヤグラムでは、ほとんどの雪結晶は水に対して過飽和の領域で成長するとしている。つまり、天然であればとうに露や霧粒ができるはずの状態なのに、それを通り越した領域である。また、その後の研究では、中谷のこの水蒸気量の測定は過小に見積もられているとして、例えば樹枝状結晶は全て水飽和を超えた過飽和のところ成長するとした修正も見られる(Kobayashi, 1960)。いずれにしても、降雪現象が日常的であることから、雪が生成するためには「過飽和」という特異な状態が、上空で日常茶飯事に起こっていなければならないことになる。しかし、天然の雪雲でも、また一般的な雲でも、「水飽和」を超える状態は観測されていない。降雪を伴っている雲でさえ、そのなかの水蒸気量は水に対して飽和かそれ以下である(Warner, 1968; Tazawa and Magono, 1973)。つまり、天然には「過飽和」は存在しないが、人工的には「過飽和」でないと雪ができないということである。これは雪の生成に関して明らかに矛盾であり、謎である。

第二の謎は、天然において人工雪のウサギの毛に代わるもの、つまり特別な「核」が存在するか否かということである。天然の雲の中には普通、ウサギの毛が存在しているわけではないので、その代わりを見出さ

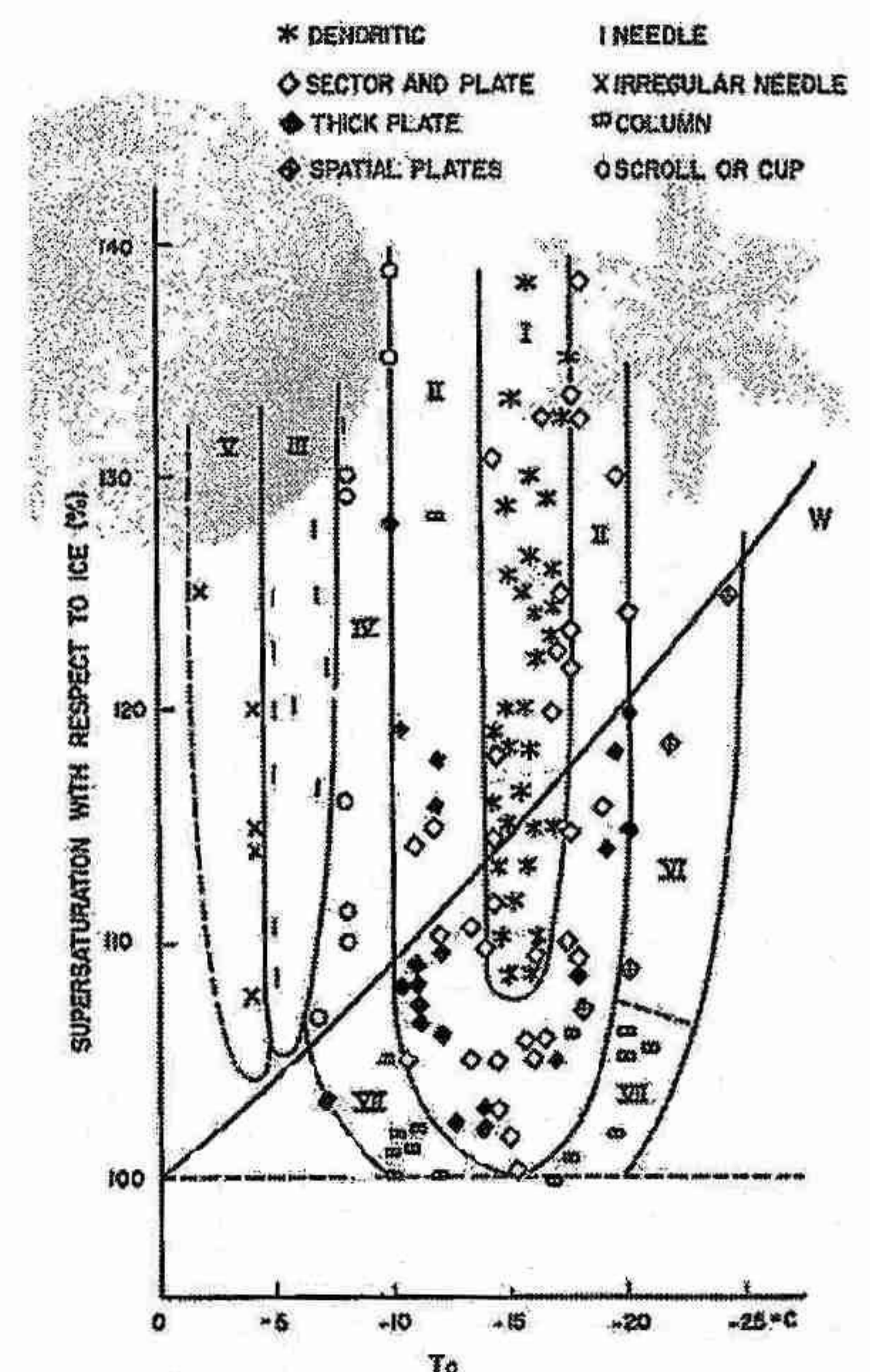


図7 中谷ダイヤグラム

なければならない。これは「氷晶核」と呼ばれ、雪の芯となる特別な「核」としてかなり以前から追い求められてきた。しかし、大気中に独自に見られる氷晶核は、平均として1リットルの空気につき2個程度である。一方、降雪中の雪結晶の数は1リットルの空気中に百～数百個で、それらには2桁ほども違いがあり、特別な核とは何かということ、つまりはウサギの毛の意味が問われることになる。

そして、謎の第三は人工雪が成長するまでの時間である。雪結晶の代表として樹枝状結晶を取りあげてみると、その径は前述のように平均3mm程度であるが、この大きさに成長するまでに人工雪の装置では少なくとも30分程度の時間がかかる。また、さや状の柱状結晶で6時間、無垢の角柱では実に70時間も長い時間が必要とされる（対流型と拡散型では結晶の成長時間に違いがある）。この間、温度と湿度はほぼ一定に保たなければならない。しかも、過飽和の状態においてである。天然の雪結晶の成長速度については雪雲内における実測値を得ることができないので、人工雪のこのような長い成長時間が天然とは異なると断定することはできないが、降雪をもたらす積乱雲内の気流の激しさなどから考えて、雪雲の中に一定不変で長時間の温・湿度の環境を求めることは相当に困難なことではないかと判断される。

7. 雪結晶作製の新たな試み

天然においては、大気の水飽和の状態に達して以降、無数に存在する凝結核に水蒸気が凝結して水滴が形成されるため、湿度が水飽和を超えることはあり得ない。また、理論的にも、氷点下であっても水蒸気が水滴となって液相に変化することの方が、固相の氷を形成するよりもエネルギー的に有利であることが示されており（黒田, 1986）、大気の水蒸気量が飽和に達したとき、通常は先ず水滴が形成されるものとみなされる。実際、以下に紹介する実験においても、 -15°C ほどの温度までは、水蒸気は液相として容易に過冷却微水滴を形成することが認められた。

人工雪の生成に関わる過飽和の問題について、その解決の手がかりがKumai (1951) により示されていた。それは、電子顕微鏡により、天然の雪結晶には無数の凝結核が付着しているということの発見である。このことは、雪結晶の成長には雲粒、つまりは過冷却微水滴が液相として関与しているのではないかということを示唆するものであった。また、一方では、人工雪の作製において、微小な過冷却水滴が樹枝状結晶などに付着して、結晶を成長させていることが観察されていた（花島, 1944）。

このようなことから、雪結晶の生成に関わって、過冷却微水滴の固相変化が直接的に観察できるように、従来とは少し異なる方法で雪結晶の作製実験が試みられた（油川, 2005b）。その結果、過冷却微水滴がそのまま氷晶に変化することや、樹枝状結晶などが過冷却微水滴を捕捉しながら成長することが認められた。このような過冷却微水滴の相変化は、微水滴の過冷却度だけで一義的に決まるのではなく、その凝結形成の過程に強く関係していることが見いだされた。

7-1 実験の装置

この実験の装置は、恒温槽により温度制御された冷媒を用いることにより、常温の実験室において実験容器（ケース）の中に過冷却微水滴を形成させ、それらの微水滴から雪結晶を生成させようというものである。装置の概略を図8に示す。装置中央部の微水滴を封入する実験ケ

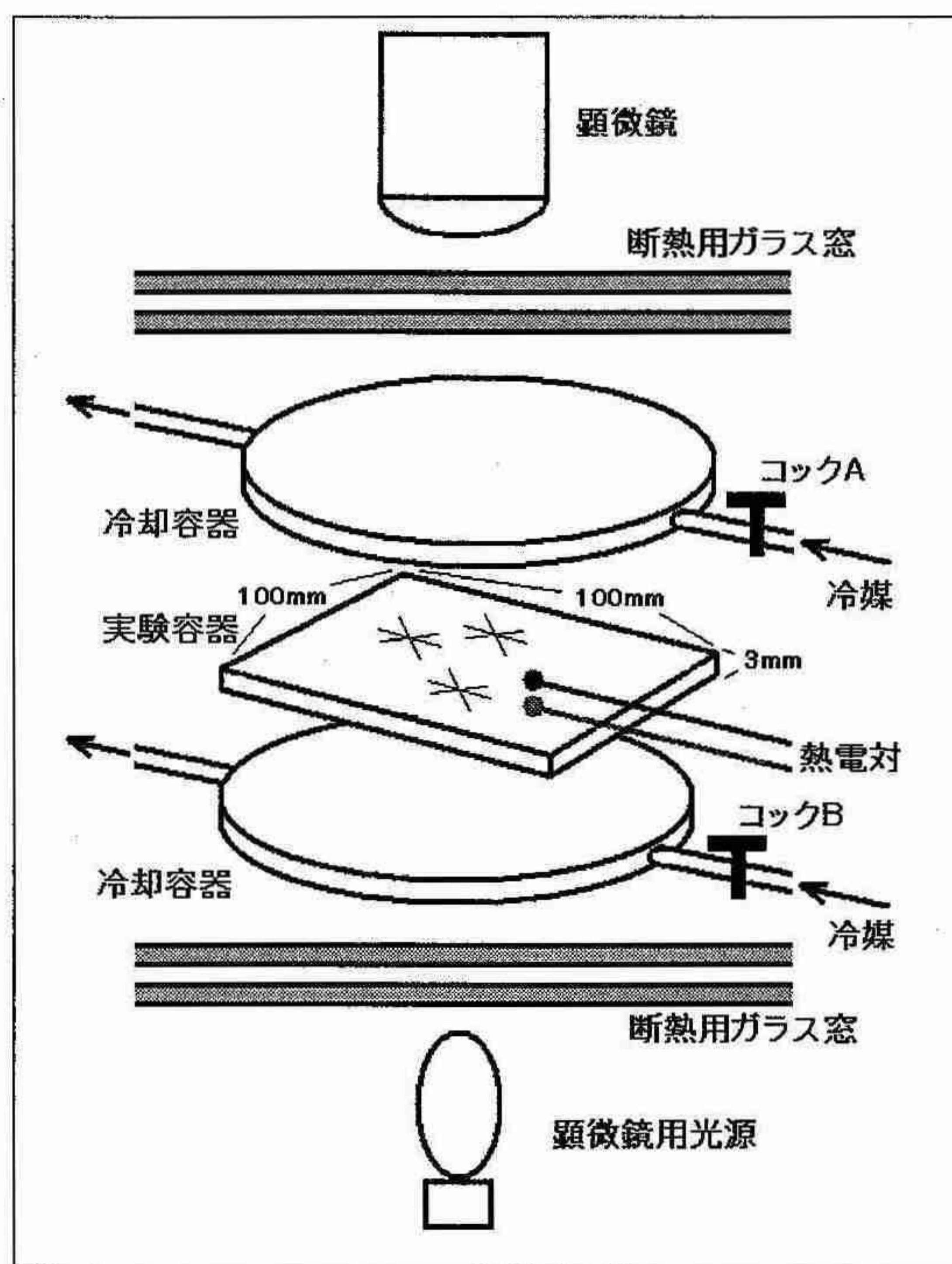


図8 過冷却微水滴による雪結晶作製装置の概略

ース（内径；10cm×10cm×0.3cm）は、顕微鏡によりその内部が観察できるように透明なアクリル板を用いて作られている。

実験の準備として、先ず、図8に示された実験ケースを取り出して分解し、上面と下面のアクリル板に合成樹脂の薄膜を貼り付ける。このような薄膜を用いる理由は、付着した水滴が空中に浮遊する雲粒のように、球状に保たれるようにするためである。また、ラップの帯電現象から、結晶成長に関する電氣的な影響を調べることもできる。

次に、噴霧器により、アクリル板の薄膜面に蒸留水の微細な霧粒を全面に噴霧する。それらが霧粒で満たされたなら、二枚の板の間に枠縁を入れ、箱状に組み立ててケースを作り、その端の数ヶ所をテープで固定した後、それをさらにラップで包んで密封する。そして、ケースの上下面の温度を測定するために、図8に示したように熱電対の感温部を各々の面の適当な箇所にテープで固定する。さらに、そのケースを冷却用の2つの円盤状容器で挟み込む。この円盤状容器は透明で、各々に冷媒の出入り口が取り付けられており、それらには1台の恒温槽から冷媒がホースで分流されて循環される。なお、この冷媒は、外部から実験ケースの中が観察できるように、透明なエチルアルコールが用いられている。

これらをさらに二重のガラス窓の付いた断熱の板で上下から囲み、数ヶ所を止め金具で実験台に固定する。そして、この上に顕微鏡を設置し、ガラス窓を通して微水滴の付着した実験ケース内に焦点を合わせ、微水滴の付着状態や変化を観察するわけである。

7-2 実験の方法

実験装置が組み立てられた後、実験ケースの冷却を開始する。この場合、ケース内において氷点下の温度で微小な過冷却微水滴を凝結させるために、このケースの冷却は二段階的に行われる。すなわち、第一段階は、上、下面のどちらか、今の場合には上面の微水滴がほとんど蒸発して容器の下面だけに水滴が付着した状態とするために、下面だけを氷点下近くの温度に冷却する。ケース上面の水滴が全て蒸発したことが確認されたならば、冷却の第二段階として、実験ケースの上面に取り付けられている円盤状容器に下面と同じ冷媒を注入し、同時に冷媒を結晶が生成する適当な温度に設定する。ケースの上下両面の冷却用容器に全く同じ冷媒が流入されることにより、温度差のあったケースの上と下の面は急速に等温度となって行く。両面が等しい温度になると、下面の過冷却微水滴から水蒸気が蒸発・拡散して上面へ凝結し、過冷却微水滴が形成されて行く。

しばらくして、ケースが設定の温度になると、上面に形成された微水滴のある部分が過冷却の破れを生じ、結晶化して一気に氷晶の生成が始まる。なお、ここで過冷却微水滴の「結晶化」とは、その水滴が氷晶や雪結晶の一部に直接、相変化することを指す。ケース上面に凝結した過冷却微水滴の多くは20 μ m内外の粒径で天然の雲粒にも近く、そのような水滴から生成された氷晶が他の過冷却微水滴を捕捉し、成長していく。また、結晶周囲の微水滴は結晶との水蒸気圧差により蒸発し、消滅していることも認められる。これは、結晶に対して過冷却微水滴から水蒸気としても水分が供給されていることを示している。過冷却微水滴から生成する氷晶は、通常においては、 -15°C ほどの温度では樹枝状結晶や扇形結晶などに成長する。また、過冷却微水滴が -10°C よりも高い温度では柱状結晶に成長する。このように、ケースの設定温度に応じて板状及び柱状の結晶が得られる。また、この実験による氷晶の生成は、板状でも柱状でも特別な核、つまり「氷晶核」を必要とすることなく、過冷却微水滴の結晶化によりもたらされる。

ところで、常温の微水滴を単に過冷却したものや、氷点下の温度であっても短時間で急激に凝結・形成した過冷却微水滴は、単に氷球状に凍結してしまう。例えば、実験ケースの上と下の面の温度差を比較的大きく保ち、強制的かつ急激な水蒸気の移送により形成された過冷却微水滴は一般的な氷球に凍結してしまい、結晶化は起こらない。

7-3 雪結晶の作製結果

上述のような実験で得られた雪結晶の例を図9に示す。これらはいずれも -15°C ほどの温度で生成されたものである。図9のaは径が2mmほどの樹枝状結晶で、その周りの小さな球形状のものは過冷却微水滴である。雪結

晶の周りの微水滴は結晶との水蒸気圧差により蒸発し、消滅している様子が見られる。この樹枝状結晶は六本の主枝がほぼ同じ大きさに成長しているが、各々の枝の側枝（二次枝）は成長の箇所や大きさが異なっており、対称性を欠いた形態となっている。これは、当初の過冷却微水滴の分布に対応したものである。

また、bの結晶の中央で水平に伸びている枝は、その下のA型に成長している樹枝状結晶と同じものを側面から見た状態である。この結晶の枝は、微水滴を挟むように、幾つもの結晶が階段状に成長している。これらは、それぞれに位置した過冷却微水滴が隣りから伸びた枝により連鎖的に結晶化し、各々が二重の鼓形状に連なって成長している。

cは、比較的多くの雪結晶の生成が見られる場合で、平均して0.5mmほどの径の結晶が30個ほど数えられ、1mm²あたりに1.5個くらいの割合で結晶が生成している。このように多くの数の氷晶を生成させるためには、実験の準備段階で室内のチリを実験ケースの薄膜上に少し多めに付着させることである。それ以外はこれまでと全く同じ実験手順で、特別な「種まき」は一切行っていない。つまり、雪結晶を生成させるための核として、一般的なチリ、すなわち凝結核が十分にその役割を果たしていると言える。

dの結晶は、この装置により作製された結晶のなかでも特異な例で、見かけとして七花になっている樹枝状結晶である。この結晶の中心部には複数の微水滴の痕跡（図の矢印）が見られることから、これは、比較的粒径の大きな過冷却微水滴が、幾つかある特定の位置関係を保ち、それらが結晶化することにより成長したものと見なされる。このような七花の成長については、氷晶核へ水蒸気が昇華して成長するというような従来の雪結晶の成長機構では理解が困難なように考えられる。

次に、過冷却微水滴のなかで生成する樹枝状雪結晶について、ビデオ映像から抽出した連続画像を図10に示す。この結晶の成長は-15℃の温度によるものである。天然の雪結晶の周りでは、図10のような密集した過冷却雲粒の分布は余り起こり得ないことであるが、結晶が雪雲内を一定時間落下するとした場合、その空間に存在する過冷却雲粒を平面に投影すれば、この程度の微水滴数になるのではないかと推測される。

図10の①と②の画面において、矢印で示された部分に結晶の発生が見られるが、その発端となっているのは比較的大きな粒径の過冷却微水滴である。そして、図10の②と③においては、各々の小さな枝が微水滴を捕捉して成長している様子がうかがわれる。この結晶は、中心が必ずしも一点にはないわけであるが、それは、複数の過冷却微水滴が中心部を形成して結晶を成長させているためで、このことは図9のdの場合と同様である。このような形態の六花は天然においてもしばしば観察されている（中谷, 1949）。なお、図10において、⑥の約1mm径の結晶に成長するまでの時間は氷晶の発生から3分ほどで、先の対流型装置の場

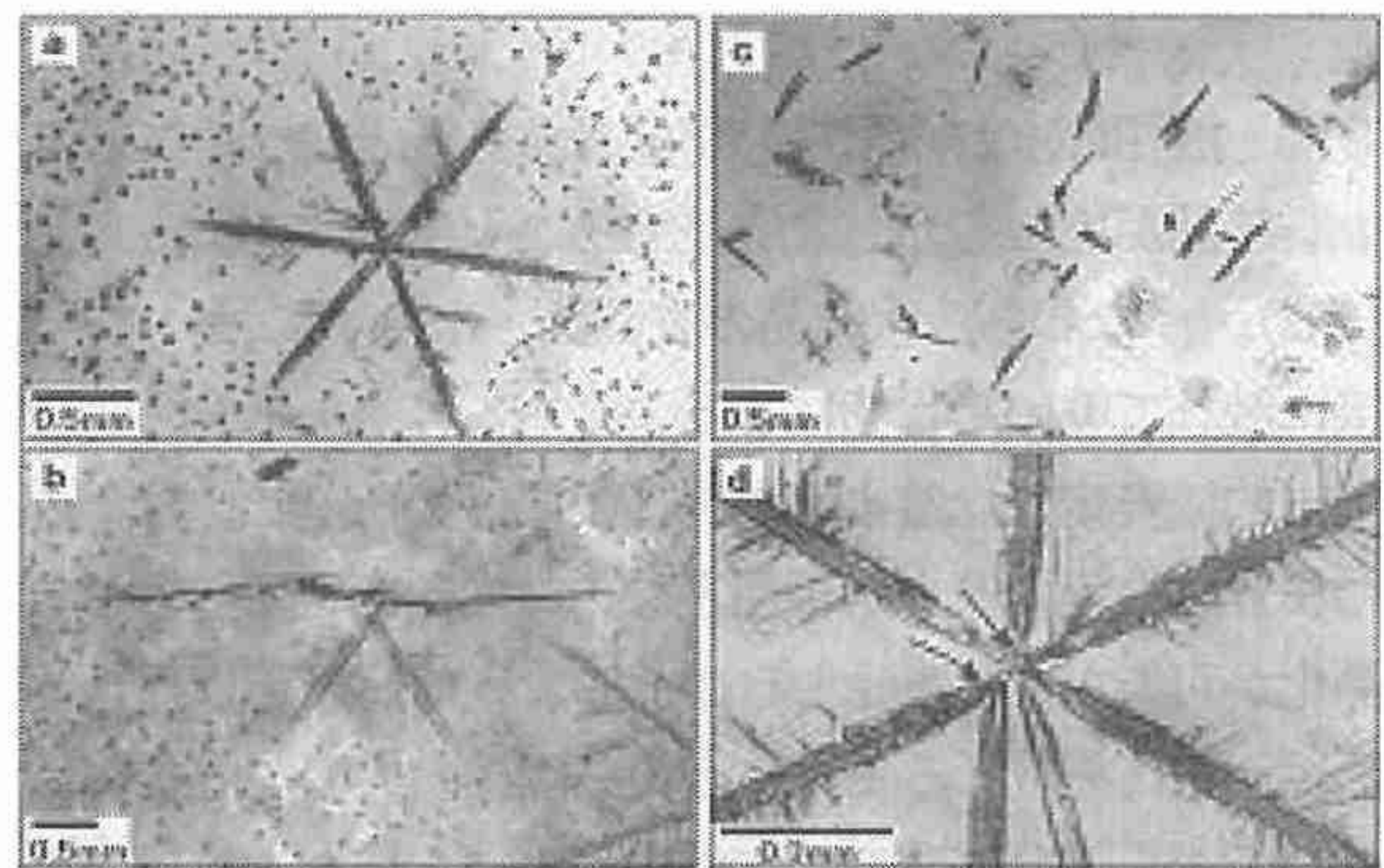


図9 実験で作製された雪結晶

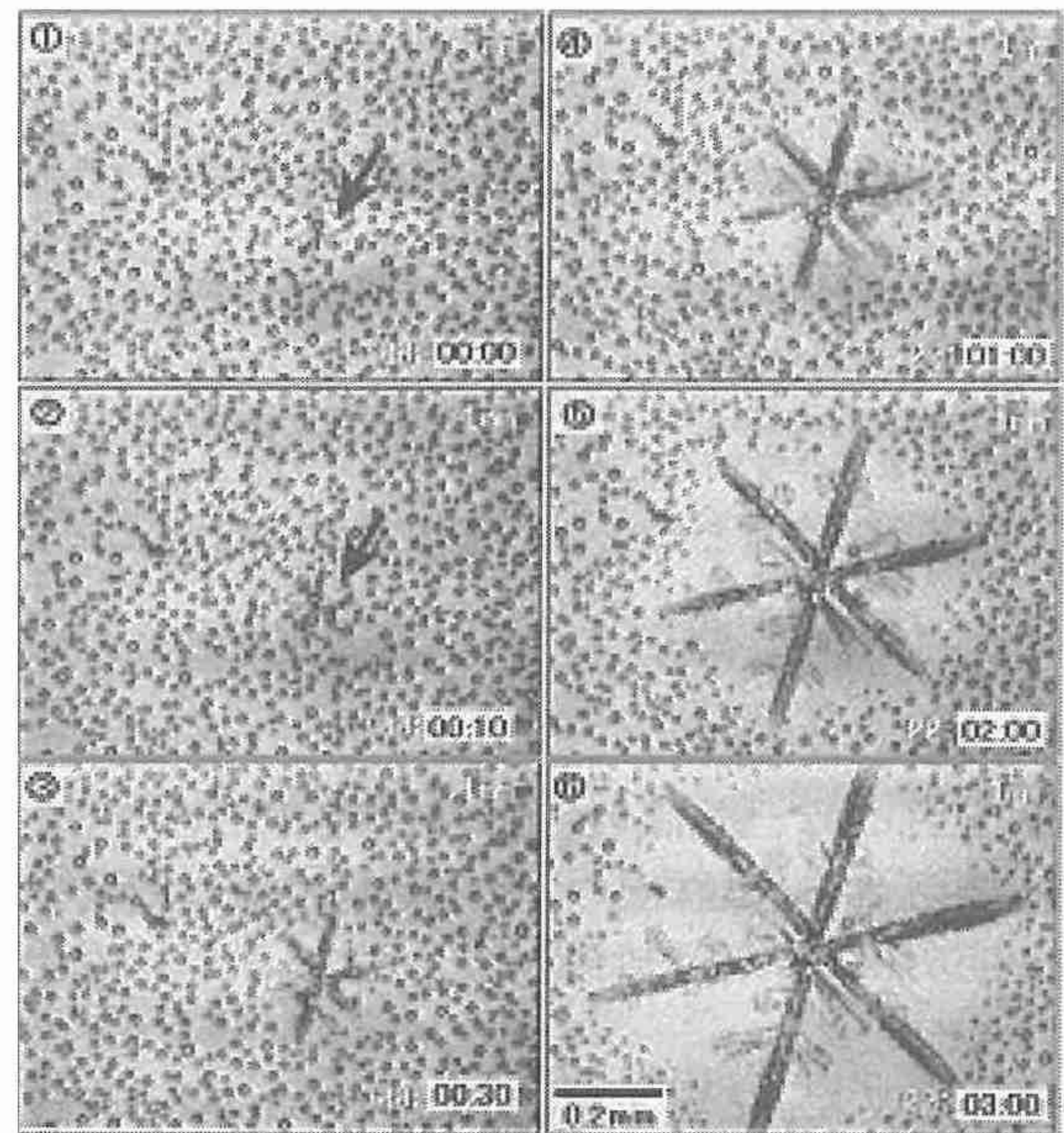


図10 樹枝状結晶の生成過程（右下の数字は分：秒）

合に比べて相当に短い時間となっている。

図10の④～⑥において特徴的なことは、結晶の周りの過冷却微水滴が蒸発していて、その空間が結晶の成長に伴って広がっていることである。ここで、この雪結晶は側枝の発達した樹枝状であることから、従来の対流型や拡散型の装置による人工雪の作製では、結晶周囲の空間が水飽和以上の過飽和状態となっていなければならないわけである。しかし、図10では画面全体に過冷却微水滴が存在し、また、水滴の蒸発も見られることから、結晶周囲の空間は水飽和ないしはそれ以下の水蒸気圧の状態にあるものとみなされる。つまり、樹枝状結晶の側枝は、主枝が過冷却微水滴を直接に捕捉・結晶化することにより（従来の装置では、それに相当する液相の溜まりを枝に形成させるため、結晶周囲の空間を水飽和以上の過飽和にする必要があったものと考えられる）、その箇所から成長するものようである。ところで、図10の結晶を含めて、これまで示してきた全ての結晶はいずれも静止した空气中で成長したものであり、雪結晶ないしは気流が移動することにより水蒸気を含んだ空気が強制的に結晶に当たり結果として結晶表面が過飽和状態になるというベンチレーション効果 (Pruppecher and Klett, 1997) などによらなくても、ほとんどの雪結晶の成長が可能であることを示している。

8. 液相の水から雪結晶が成長することについて

雪結晶が液相を介して成長することは理論的にも示されている (Lacmann and Stranski, 1972; Kuroda and Lacmann 1982)。すなわち、氷結晶の表面は、氷点下においてもある厚さの水の液膜で濡れている状態の方が、水蒸気と直接に触れて乾いた状態にあるよりも、エネルギー的に有利であるということである。そして、その液膜にはエネルギー的に安定となるような平衡の厚さがあり、液膜が厚くなっても、薄くなっても、エネルギー的に安定な方向、つまりは液膜の厚さが平衡となる方向へ変化するわけである。このようなことから、雪結晶の枝が過冷却微水滴（結晶化が可能な）を捕捉することによって、あるいは水蒸気圧差により水分が蓄積して、液膜が平衡の厚さ以上になれば、それを減じるように液相-固相の界面で固相が増加し、結果として結晶が成長することになる。逆に、結晶の表面から水分が蒸発して液膜が薄くなったときは、その厚さを増すように、同様の界面において固相から液相への転化が生じるものと考えられ、結晶は消耗していくことになる。このようなことから、先の実験、すなわち過冷却微水滴からの雪結晶の成長が理解されることになるであろう。

9. おわりに

「雪は天からの手紙」か？という問いは、結局、雪の気相成長説を検証することと同義であると言える。これまで述べてきたことや紹介してきた実験は、この説にある種の疑問を呈するものであった。そのような観点からではあるが、「天からの手紙」については、そこに専門的な意味を求めて雪結晶から具体的な気象を解釈しようとするよりも、中谷宇吉郎の科学的発見や研究の成果が“昇華”されたものとして、かつ、それが抽象化されたものとして、そのまま享受することの方が適切であるように思われる。中谷のこの言葉が、自然への憧れを限りなく沸き立たせてくれる名言として、長く語りつがれていくことを望んでやまない。

参考文献

- 油川英明, 1992: 雪結晶の「裏」と「表」について. 雪氷, 54, 123-130
 油川英明, 2005a: 雪結晶のカラー及び暗視野の顕微鏡写真. 天気, 52, 33-35
 油川英明, 2005b: 過冷却水滴の結晶化による雪結晶の生成. 北海道教育大学紀要 (自然科学編), 第55巻, 第2号, 1-12
 Bentley, W. A. and W. J., Humphreys, 1931: Snow Crystals. McGrawHill Book Co., New York, 226pp.
 Hallett, J. and B. J. Mason, 1958: The influence of temperature and super-saturation on the habit of ice crystals grown from vapour. Proc. Roy. Soc., 247, 440-453

- 花島政人, 1944 : 人工雪の生成条件について—補遺. 低温科学, 物理篇, 2, 23—29
- 樋口啓二, 1962 : 雪の結晶の観察と記録. 気象研究ノート, (13), 45—58
- 平松和彦, 1997 : 平松式ペットボトル人工雪発生装置. <http://www1.ocn.ne.jp/~kojihk/kazupage/pet.htm>
- Iwai, K., 1983: Three-dimensional structure of plate-like snow crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61, 746-755
- 香川喜一郎・伊藤文雄・澤 大輔・佐々木恭介・服部浩之, 2003 : 帯電したタンポポの毛を用いた人工雪生成実験. 雪氷, 65, 29—32
- Kikuchi, K. and H. Ueda, 1987: Formation mechanism of eighteen-branched snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido University, Ser. VII*, 8, 109-119
- Kobayashi, T., 1960 : Experimental Researches on the Snow Crystal Habit and Growth using a Convection-Chamber. *J. Meteor. Soc., Japan*, 38, 231—238
- 小林禎作, 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, 物理編, 27, 395—397
- Kobayashi, T. and Y. Furukawa, 1975 : On twelve-branched snow crystals. *J. Crystal Growth*, 28, 21-28
- 小林禎作, 1982 : 雪華図説正+続[復刻版]・雪華図説新考. 築地書館, 161pp.
- Kumai, M., 1951: Electron-Microscope Study of Snow-Crystal Nuclei. *J. Meteor.*, 8, 151-156
- Kuroda, T. and R. Lacmann, 1982: Growth kinetics of ice from vapour phase and its growth forms. *J. Crystal Growth*, 56, 189-205
- 黒田登志雄, 1984 : 結晶は生きている. サイエンス社, 265pp.
- Lacmann, R. and I. N. Stranski, 1972: The Growth of Snow Crystals. *J. Crystal Growth*, 13/14, 236-240
- 前野紀一・黒岩大助, 1966 : 雪結晶の中の気泡, 低温科学, 物理篇, 24, 81-89
- 村井昭夫, 2005 : ペルチェ素子を使用した対流型人工雪生成装置の製作. 雪氷, 67, 341—351
- 中谷宇吉郎, 1949 : 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 161pp.
- Nakaya, U., 1954: Snow Crystals—Natural and Artificial—. Harvard University Press, Cambridge, 510pp.
- Pruppacher, H. R. and J. D. Klett, 1997: Microphysics of Clouds and Precipitation(2nd edition). Kluwer Academic Publishers, 954pp.
- Tazawa, S. and C. Magono, 1973: The Vertical Structure of Snow Clouds, as Revealed by “Snow Crystal Sondes” Part I. *J. Meteor. Soc., Japan*, 51, 168-175
- Warner, J., 1968: The Supersaturation in Natural Clouds. *J. de Rech. Atmos.*, 3, 233-237