



雪のパラダイム (I)

油川 英明¹⁾

1. はじめに

今回、本誌の担当編集委員より拙子の研究回想が求められたことを機会に、雪結晶に関するパラダイムとその転換の必要性について考察を行い、本小論のようにまとめた。

科学研究の分野におけるパラダイムの変換は、もとより安易に考えるべきものではなく、相応の慎重さと実証性が求められるわけであるが、特に雪結晶に関しては、従来のパラダイムにより過去 70 年余にもわたる研究業績が積み重ねられてきていることから、なおさら慎重を期さなければならないことは自明のことである。それ故、本小論の読者には忌憚のない批判を仰ぐとともに、公平峻厳な議論が展開されることを願うものである。

さて、中谷 (1949) は「雪の研究」の緒言において、「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」と述べ、また、Nakaya (1954) においても同様のことが記されている。これは、中谷を中心とした雪結晶研究の総括的結論であり、かつ雪の結晶に関する一大パラダイムの構築でもあった。そして今日まで、雪結晶の研究はこのパラダイムの枠のなかにおいて実験や理論の活動が進められ、多くの研究論文やテキスト・解説書等が公表されてきている。

パラダイム論そのものについては種々議論のあるところではあるが、それは科学研究の方法論として一定の役割を担い得るものであると考えられる。すなわち、ひとつの研究分野のパラダイムを確かめることは、その研究のバックボーンを把握し、研究内容を整理することになるわけである。特に、自分の行っている研究がどのようなパラダ

イムのなかでなされているのか、そして、それがパラダイムの何に関与し、パラダイムをどのように充実あるいは改革しようとしているのか等を見定めることができるならば、それは自己の研究展望を確立し、かつそれを具体的に切り開いていくことにつながるものと思われる。

自然に関わる研究の活動は、一般に、その研究分野のパラダイムが天然と明らかな矛盾を生じたときに活性の機会を得る。つまり、その矛盾の「解消」を目指す活動が研究であり、そしてそこには二つの方向性が考えられる。一つは、既存のパラダイムを堅持する立場から、天然の現象にそのパラダイムを近づけるような工夫 (実験や理論) を創出することであり、他の一つは、パラダイムそのものを天然に従うように転換 (シフト) することである。本小論は雪結晶のパラダイムについて後者の道を選択するものであるが、その理由等については、従来の人工雪作製法とは異なる著者の実験結果をもとに、若干の推察をまじえて以下にその概要を述べるものである。

2. 人工雪の生成条件について

2.1 人工雪の謎～水蒸気の過飽和について

従来の人工雪作製について、その条件を天然の現象に対比してみると、幾つかの「謎」に突き当たった。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。図 1 に示した中谷ダイアグラム (Nakaya, 1954) では、ほとんどの雪結晶は水に対して過飽和の水蒸気量域で成長するとしている。つまり、天然であれば露を結び、霧粒や雲粒ができるところではあるが、それを通り越した状態ということである。この状態は、大気中に異物

1) 元北海道教育大学教授

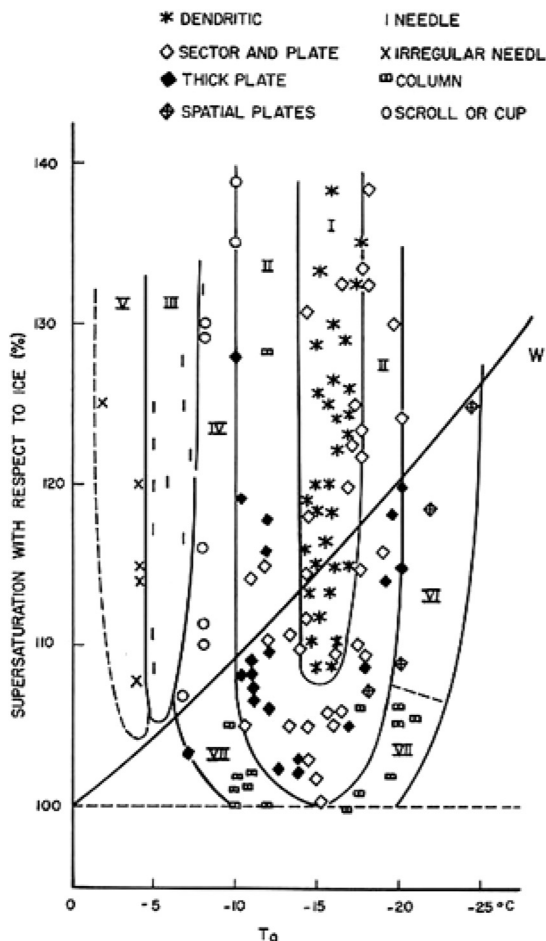


図1 中谷ダイアグラム. W は水飽和曲線.

や凝結核が全く存在しないという、およそ実際的ではないことが要求される。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で成長するとした修正も行われている (Kobayashi, 1960)。いずれにしても、降雪現象は日常的なことであるから、雪が生成されるためには「過飽和」という特異な状態、端的には、雪雲の無いような状態で雪が降るという不可解なことが日常茶飯事に起こっていない必要になる。

実際には、天然の雪雲でも、あるいは一般的な雲でも、「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の場合がほとんどである (Warner, 1968 ; Tazawa and Magono,

1973)。つまり、天然には人工雪を成長させるような「過飽和」は存在しないと考える方が妥当である。しかし、人工的には「過飽和」でないと雪の作製ができないということから、その生成に関しては明らかに矛盾が存在していることになる。なお、中谷ダイアグラムにおいては、人工雪の成長に関わる過飽和度は、空気中の水蒸気と過冷却微水滴を含めた水分量を湿度に換算して示されている (Nakaya, 1954)。

さらに、上述の過飽和度に関連したこととして、対流型的人工雪作製装置による中谷ダイアグラムには、その過飽和度に「上限」があり、それは 140% (氷に対して) とされている (花島, 1944)。水蒸気の量が多すぎると雪結晶が成長しない、ということ自体に疑問を感じざるを得ないが、一方、拡散型の装置では、過飽和度が 300% (氷に対して) でも結晶の成長がなされている (Hallett and Mason, 1958)。このことは、雪結晶を成長させる水蒸気は、温度と密度が同じであれば一般的には同等のものであると考えられてきたが、対流型と拡散型という水蒸気の輸送形態 (凝結過程) が雪結晶の成長に何らかの影響を与えているのではないかということになる。このことについては後に述べる。

2.2 人工雪の謎～氷晶核について

第二の謎は、天然において人工雪の兎毛に代わるもの、つまり特別な「核」が存在するか否かということである。中谷 (1949) は当時の実験で、兎毛には雪結晶が成長しやすいということから、それに代わるものとして「或る種の核」、つまり雪の芯となる特別な「核」としての「氷晶核」がその生成には必要であるとみなしたわけである。そして、このようなことから氷晶核としての特別な物質が追い求められ、現在に至っている。しかし、大気中において観測される氷晶核は、空気 1 リットルにつき平均 2 個程度で (高橋, 1987)、一方、降雪中の雪結晶の数は 1 リットルの空気中に百～数百個が一般的であることから、それらには 2 桁ほど違いがあり、これも矛盾であるといえる。結局、特別な核とは何かということ、つまり人工雪の実験に用いられた兎毛の役割について、原点に返って再考することが必要となってくる (熊井, 1996 など)。

2.3 人工雪の謎～結晶の成長時間について

第三の謎は、人工雪が成長するまでの時間についてである。雪結晶の代表として樹枝状結晶を取りあげてみると、その径は平均として 3mm 程度（中谷, 1949）であるが、この大きさに成長するまでに人工雪の装置（対流型）では 30 分以上の時間を要する（拡散型装置ではより長い時間が必要）。また、さや状の柱状結晶で 6 時間、無垢の角柱では実に 70 時間もの長い時間を必要とする（中谷, 1949）。この間、温度と湿度は定まった値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。天然の雪結晶についてはその成長速度が実測できないので、人工雪の成長時間が天然に比して余りにも長すぎると断定はできないが、降雪をもたらす積乱雲内の気流の動き（佐藤・若浜, 1991）などから考えて、雪雲の中に上記のような一定の温度・湿度（過飽和）の環境が長時間にわたって継続されることは、ほとんど不可能なことであると推断される。

また、疑問的なこととしてさらに述べるならば、人工雪の作製実験において、対流型であっても拡散型であっても、水蒸気の補給箇所と結晶の生成箇所との温度差が天然と比較して極端に異なることである。例えば、樹枝状結晶の成長において、人工雪の装置ではわずか 50 cm ほどの高さ距離で 30℃ もの温度差が必要とされるが、天然においてこれほどの温度勾配は通常、起こり得ないわけである。このような装置の構造は室内実験としての便宜的な理由から決められたものとしても、天然と同様の雪結晶が作製されたことで実験の全てが認容されるということではなく、それが天然に対してどのように適応し得るかについて、実際的な観点からの検討が必要であるように考えられる。

3. 過冷却微水滴からの人工雪作製実験

3.1 “過飽和水蒸気”の解明に向けて

天然においては、大気が水飽和の状態に達した以降は無数に存在する凝結核に水蒸気が凝集して水滴が形成されるため、一般的には湿度が水飽和を超えることはあり得ない。また氷点下であっても、水蒸気が直接に氷晶となることより、水滴となって液相に変化することの方がエネルギー的に有利であるとされている（黒田, 1984）。これらの

ことを勘案すれば、たいがいの大気においては、飽和水蒸気を超えた水分は水滴として凝結するとみなすことができる。実際、以下に紹介する氷晶の作製実験においても、氷点下において、飽和水蒸気以上の水分は過冷却微水滴として凝結し、かなりの低温度まで液相の状態に保たれることが認められている。

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) により示されている。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発見である。このことは、雪結晶の成長には雲粒、つまり過冷却微水滴が関与しているのではないかとすることを示唆するものであった。また、対流型の人工雪作製装置においては、微小な過冷却水滴が樹枝状結晶などに付着して結晶を直接に成長させることが観察されている（花島, 1944）。つまり、天然においても実験においても、雪結晶の成長に過冷却微水滴が関わっているとすれば、これまで述べてきたような水蒸気の過飽和という問題に解決の糸口が見いだされることになる。

このようなことから、また、著者の学部卒業実験における氷晶の偶然的な生成にヒントを得て、天然の雪雲の形成に関して種々想像し、そして、それを頼りに、低温実験室での過冷却微水滴の凍結実験を開始した。

3.2 過冷却微水滴の氷晶化実験

実験は、当初、極めて簡単に考えていた。すなわち、微小な水滴は冷却されれば容易に過冷却状態となり、その過冷却の破れを観察すれば良いはずであると。それで、透明の適当なケースのなかに噴霧器で微水滴を散布し、それを低温実験室に持ち込んで冷却し、過冷却となった微水滴の凍結過程を観察することにした。過冷却微水滴が六花の氷晶へと変化することを期待してのことであったが、幾ら試してみても微水滴はそのまま氷球状にしか凍結しなかった。天然の雲のことをあれこれと考え、微水滴の冷却の方法を段階的に行ったり、ケースの材質を変えてみたり、噴霧器を交換したり、果ては積雪を融かした水で微水滴をつくってみたりと、思いつくことはことごとく試してみたが、結果はいずれも期待したものにはならなかった。「天のものは天にしか作れない」と言われている

るような気持ちになったのも確かであった。

幾度も「これが最後の実験」と言い聞かせて低温実験室に入って行ったわけであるが、結果は同じであった。そして、本気で「店じまい」をしようと考えた実験で、偶然の作業手順によるものではあったが、ケースのなかを顕微鏡で移動しながら覗いていると、視野のなかに突然、一個の氷晶が飛び込んできた。それはまさしく六花であった。そのときの興奮は身体の芯が震えるほどのものであったと、今も記憶している。

偶然の作業手順とはどのようなものであったのかを思い起こし、それをはじめて再現してみたところ、まぎれもなく過冷却微水滴が氷晶に変化した。そして、その結晶があたかも昆虫の触手のように枝を伸ばして過冷却微水滴を捕捉し、見る見る大きくなっていくのである。「偶然」のポイントは、過冷却微水滴の凝結・生成条件とその過程にあったのである。思えば、天然の雲（雲粒）の形成と同じことであった。微水滴は一般に、どのように過冷却をさせても水球状にしか凍結しないが、上記の条件に沿った過冷却微水滴は容易に氷晶へと変化する。このことについての理由は未だに不明で「霧の中」にあるが、「偶然」の作業手順はそのまま実験の装置と方法に組み込むことができた。以下にその実験（油川，2005）の概略を述べる。

3.3 氷晶化実験の装置と方法

図2は、実験装置の氷晶作製部分を模式的に示したものである。図の「実験容器」に微水滴を散布し、それを上下二つの「冷却容器」で挟んで冷却して微水滴を過冷却することになる。このとき、まず下側の冷却容器だけに冷媒を通し、実験容器の下面を上面よりもしばらく低い温度に保ち、水分を全て下面に凝結させる。

次に、実験容器の上面から水滴が全て蒸発し、下面の温度が氷点下になったところで、冷媒を実験温度に、例えば、樹枝状結晶の成長実験であれば -15°C ほどに設定し、それを上下の冷却容器に注入する。その結果、水滴が全くなかった実験容器の上面に徐々に水蒸気が拡散して行き、氷点下で即時に過冷却となった微水滴が生成することになる。このとき重要なことは凝結の速さで、天然の雲粒程度の大きさに成長するまでに30分以上の比較

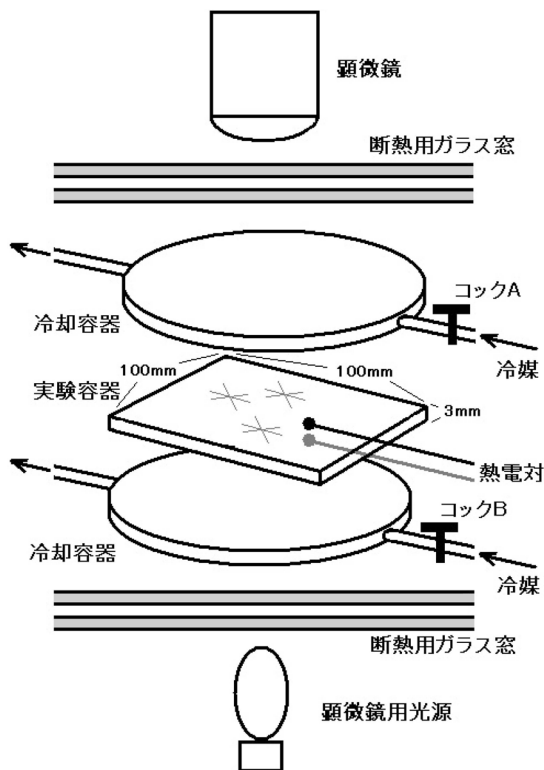


図2 過冷却微水滴による人工雪作製の装置（概略図）。常温の実験室で操作が可能。

的長い時間をかけるようにすることである。

このような水蒸気の凝結過程により生成した容器上面の過冷却微水滴は、 -15°C ほどで過冷却が破れ、氷晶へと変化する。これよりも高い温度で水滴の過冷却を破って氷晶化させるには、実験容器に若干の温度勾配を与え、上面の水滴にやや強制的に水蒸気を凝結させてやればよい。

3.4 氷晶化実験の結果～過冷却微水滴の氷晶化過程

図3は、上記の実験により過冷却微水滴が氷晶化していく過程を示したもので、実験における顕微鏡の観察視野をビデオ撮影したなかから適当な画像を抽出したものである。

この図は、約 $17\mu\text{m}$ 径の過冷却微水滴が、上端から成長してきた樹枝状結晶の先端によって接触され、氷晶状に結晶化していく様子を図の1から6へと時系列的に示したもので、62秒間ほどの変化である。この微水滴は、樹枝状結晶により接触を受けた瞬間、図3の2のように全体が六角形に急変している。その後、接触された樹枝とは反対方向

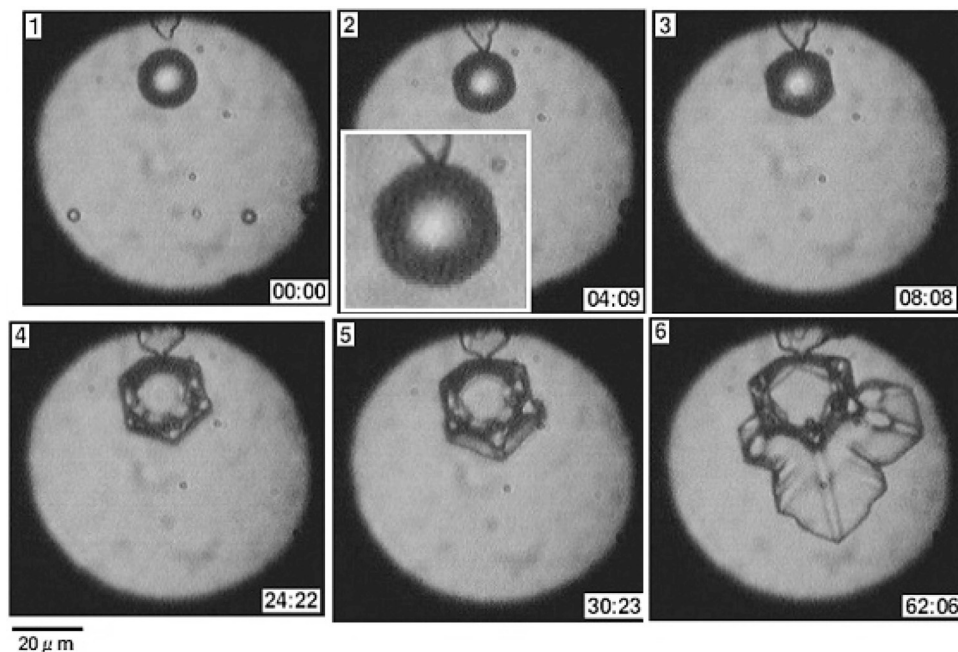


図3 過冷却微水滴の氷晶化. ビデオの映像から適当な画像を抽出したもの. 各画像の右下に経過時間を[秒:コマ数(30コマ1秒)]で示す. 画像2の左の図は拡大した微水滴像で,すでに結晶化が始まっている.

(図の下方)に結晶は成長しているが,微水滴のそのものも中央部などで徐々に変化してきている.

このような微水滴の変化及びそれに伴う氷晶の生成は,周囲の水蒸気の昇華によるとするよりも,過冷却微水滴が直接に結晶化しているものと見なすことの方が妥当ではないかと考えられる.なお,過冷却微水滴が他の結晶の接触によらず,自発的に(水蒸気の急激な凝結が刺激となる場合が多い)結晶化する場合は,その微水滴が雪結晶の中心部を構成するように変化・成長する.

天然の雪結晶においても,その中心部にしばしば円形文様が見られる場合があるが,それは図3のような成長の結果であると考えられる.

3.5 氷晶化実験の結果～種々の結晶の生成

図4は,本実験により生成した種々の結晶である.これらはいずれも -15°C の温度で,数分程度の時間により成長したものである.特に,図のcは,微水滴を散布する容器を事前に室内の空気にさらして塵を取り込んだときの実験によるもので,多数の氷晶の生成が見られる.つまり,氷晶は特別な核によらなくても,一般的な塵,すなわち凝結核によって生成するものであることがわかる.

また,過冷却微水滴による結晶成長の時間は,上記のように,従来の人工雪の作製に比して格段に短いものとなっている.

3.6 氷晶化実験の結果～電場による結晶の特異な成長

図5は,これまでと同様の実験であるが,容器内に電極を取り付けて電場をかけた場合である.電極は1cmの間隔とし,20ボルトの直流電圧を負荷した.その結果,結晶は電極の違いにより異なった成長を見せた.すなわち,図の上部はプラス極で,そこには板状結晶が成長し,図の下部はマイナス極で,柱状の結晶が同時に成長している.温度はいずれも -15°C に保たれたままである.つまり,板状及び柱状の結晶形態は,温度だけではなく,電場にも影響を受けるということである.

このような実験の結果からすれば,中谷ダイアグラムの結晶成長に関する温度の一義性は,普遍的なものというよりも,ひとつの限定された条件によるものではないかということになる.

また,実験初期の状態を示した図5の左側の画像では,過冷却微水滴の数は上方のプラス極の方が下方のマイナス極よりもはるかに多くなっている

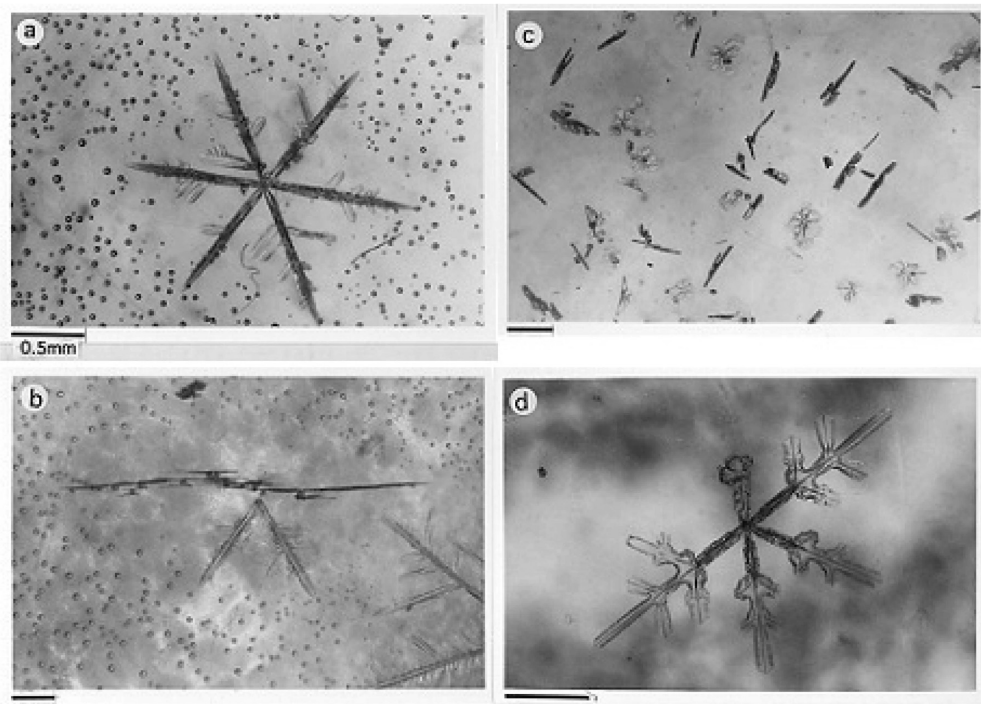


図4 実験装置で生成したいろいろな結晶。aは樹枝状結晶，bは垂直方向に成長した樹枝で，それに立体状の樹枝が逆V字型に伸びている。結晶の周りには黒い点は過冷却微水滴。cは塵により生成した多数の氷晶，dは放射状に成長した五花の樹枝状結晶で，六花の結晶の枝が離散したものではない。スケール目盛りはいずれも0.5mm。

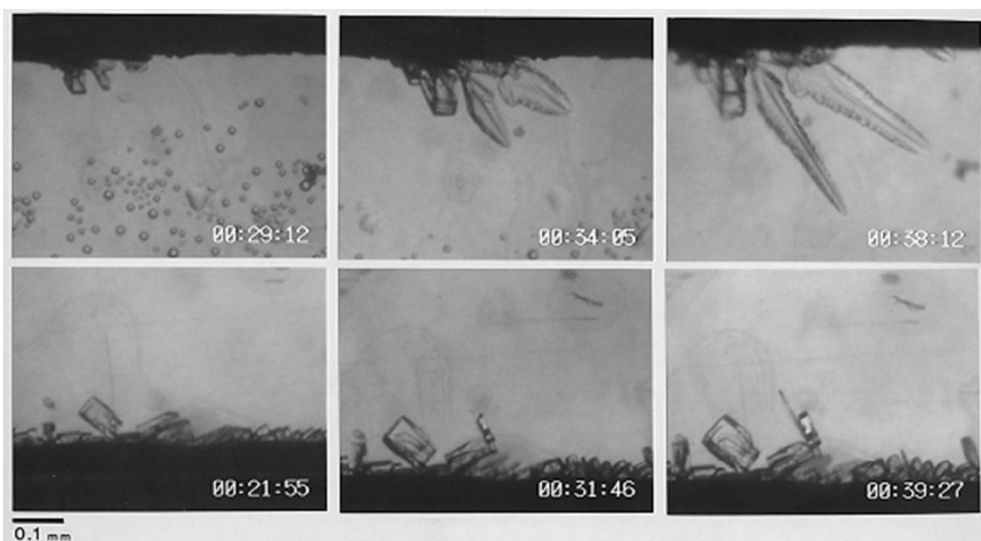


図5 電場の中での結晶の成長。上方がプラス，下方がマイナスの電極側。電極の距離は1cmで，その間に20ボルトの直流電圧が負荷された。タイムマークは[時:分:秒]を示す。温度は -15°C 。

ることがわかる。このことは、過冷却微水滴の生成過程と帯電現象との関連性として興味を持たれるところである。

*以下、「雪のパラダイム(Ⅱ)」へ続く。また、参考文献はまとめてⅡ篇に掲載する。