

過冷却微水滴から生成・成長する雪結晶について

油川 英明 (北海道教育大学・岩見沢校)

1. はじめに

地表や海水面から蒸発した水蒸気は、大気中を上昇することによって、それを含んだ気塊が飽和に達した段階から核(凝結核)に凝結し、液滴となって雲粒を構成する。温度の低い上空では、これらの液滴が過冷却微水滴として存在し、冬季にはその群中で形成された雪が降雪となって地上に降り積る。

雪結晶の生成・成長に関しては、中谷により1936年に人工雪の製作がなされ、これを起点として雪結晶の研究がおし進められてきた。中谷は雪の生成条件として(以下、「中谷の条件」と呼称)、1)常に氷晶核が存在すること、2)適当な温度、湿度(過飽和)の条件により相応な水蒸気の昇華作用があること、3)生成するための適当な時間(樹枝状結晶においては1~2時間)が必要なことを条件としてあげている。これらは、現在においても雪結晶の実験や理論のベースとされている。

一方、このような条件が天然においては必ずしも通常でないことは、以前より指摘されてきているところである。1)については氷晶核濃度の問題で、例えば-15℃においては1個/リットル程度の氷晶が活性化されるにすぎないこと、また2)については、天然では過飽和の状態よりも上述のように水蒸気が凝結して液滴化した方が安定であり、たとえ過飽和度が観測されたにしても僅かに飽和を上回る程度で、樹枝状結晶が生成するとされている数十パーセントもの過飽和度をもった気塊の存在は困難であること、そして3)においては、このような希有の状態が雲の中で長時間にわたって固定されなければならないということであり、温度だけをとりあげても相当に難しいことと考えられる。そして、そのような条件の存在を仮定したとしても、さらに、一降雪時には千差万別の結晶が降ってくるわけで、ひとつの雲の中にそれらの形に応じた温度、湿度条件が無限に近いだけ存在しなければならないことになり、益々天然とかけ離れた状態を想像しなければならないことになる。また、生成条件に特に制限がないにもかかわらず、冬季を通して、降雪中に見られる柱状結晶の数が板状結晶に比べて極めて少ないことも中谷の条件だけからは導き難い。

このような幾つかの疑問から、天然にできるだけ近い条件で雪結晶を作製することを試み、その生成・成長過程をビデオカメラにより観察・記録した。予備実験的な結果ではあるが、以下にその一部を紹介する。

2. 実験方法

実験の方法は図1に示したように、過冷却雲の2次元モデルを想定した比較的簡単な仕組みによるものである。雪結晶を生成する容器は、10cm x 10cmの広がり、1~0.5cm程度の高さであるが、大きさには特別な理由が無く、実験上の取り扱い易さから決められたものである。但、高さは出来るだけ低いものの方が良い結果を得ることができた。次に、実験の手順を述べると、まず、常温の実験室で合成樹脂の薄膜に微水滴を付着させた後、上記の大きさに作った骨組みに、水滴が付着している方を内側にしてその薄膜を張り付けるわけである。この時、容器から空気の漏れがないように充分確かめる。これをゆっくり過冷却させるために、今回の実験では、-5℃の低温実験室に1~2時間の間放置した。この場合、容器の上下に若干の温度差をあたえ、片面の薄膜から水滴を蒸発させて、その後、この容器を-20℃の低温実験室に設置された顕微鏡にセットし、水

滴の蒸発した薄膜に再度微小な水滴を凝結させて、その適当な箇所焦點を合わせテレビカメラで撮影を開始する。このように再凝結させる理由は、極めて微細な(径が $10\mu\text{m}$ 程度の)過冷却水滴を得ることができることであるが、このようにすると雪結晶がよく生成することも確かだ、詳細なことは検討中である。

- 20°C の低温実験室に移動された容器は、 $10\sim 20$ 分程度の時間が経過すると、微水滴群のある箇所から木の芽が伸びるように、あるいは紙に描かれた文様があぶり出されるように、雪結晶が生成してくる。この箇所は事前に予想することが困難で、今回は顕微鏡の焦點が合った場所で偶然的に観察がなされた。尚、容器内の温度は特に測定していないが、実験の経過時間及び顕微鏡の照明により、室温よりも若干高いものと考えられる。

ところで、今回の雪結晶生成の実験では、従来のような異物質による種まきや他所で生成した氷晶を挿入するなどの方法は一切行っていない。実験容器に含まれているものは、水滴や水蒸気の他に通常の実験室に存在する塵などで、特別な氷晶核が紛れ込んでいることは想像し難い。均一核生成による現象にしては少し温度が高いようにも考えられる。このことに関しては、今後の実験において慎重に確かめなければならないことである。

3. 実験結果

ここでは、図1に示されたビデオカメラによる撮影記録を紹介し、実験の結果について述べるものとする。図2は、撮影後のビデオテープからプリント出力で得られた画像で、6枚一組になっており、画像右上の数字が経過した時間(秒)を示したている。ここで、0秒とした左最上段のスタートの画像は、図のBの結晶が出来始める瞬間で、これが120秒後には図の右下端に示されたように約 0.2mm の水平な六花の結晶に成長していることがわかる。また、Aの結晶は30秒の画像あたりから生成しており、これは斜めに傾いた状態で大きくなっている。同様にCは0秒の画像よりも少し前から生成し始め、これが最後の画像では二重板状結晶を水平方向から見るように成長している。このCの結晶で興味深いことは、板状の成長(a軸方向の成長)とともに、その間隔も段々に伸びてきている(c軸方向の成長)ことである。これは10秒と120秒の画像を比較してみれば明らかである。他の結晶もそれぞれの方向に成長している様子が見られる。

結晶の生成時を見てみると、この図から、水平方向に大きくなる結晶では幾つかの微水滴が融合するような現象が見られる(B、Eの結晶)。この図には示されていないが、水平以外の方向に伸びる結晶も、近傍の微水滴が瞬間的に結合するような場合がある。画像の分解能上断定はできないが、このような微水滴同士の融合、あるいは空気中から過冷却水滴への微水滴付着が、何らかの作用で雪結晶の核生成及び結晶成長を促しているのでは

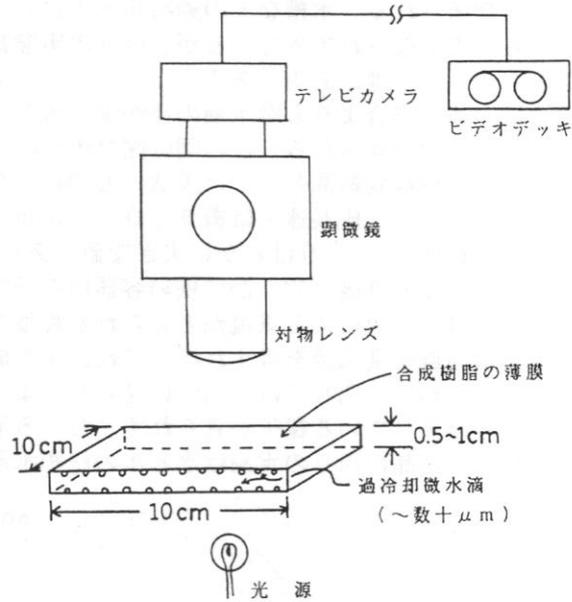


図1 雪結晶生成過程の観察装置

ないかと想像される。水槽などの過冷却水中における円盤結晶や樹枝状結晶の成長はこれまでも報告がなされてきているが、今回の実験結果をそれに類似した現象として推察することも一考の余地があるであろう。

図3は上述の場合よりも微水滴の径が少し大きい場合の例で、 $20\mu\text{m}$ ないしはそれよりも大きなものが見られる。この図は図2のBのように生成し始め、約4分経過した時の結晶である。樹枝状結晶としては天然のものにかなり近い大きさや形を示している。最大径は 1.3mm で、成長速度は概算で $0.3\text{mm}/\text{min}$ となり、これまで示されてきた気相成長の速度よりはるかに大きな値である。前述したように、この実験は過冷却雲中の2次元的な取り扱いで、かつ狭い容器内の空気は少しの温度差による弱い対流ないしは水蒸気の自己拡散による気流が考えられる程度なので、実際の雲内における3次元的な過冷却微水滴群や乱気流を考えれば、これ以上の成長速度が期待される。

結晶の成長形態に関しては、図3に見られるように、最も成長が進行している枝先の微水滴は余り蒸発している様子が見られず、むしろ液滴のまま枝先に取り込まれている現象が見られる。結晶の周りの水滴は氷と水の飽和水蒸気圧差で蒸発が生じているわけである

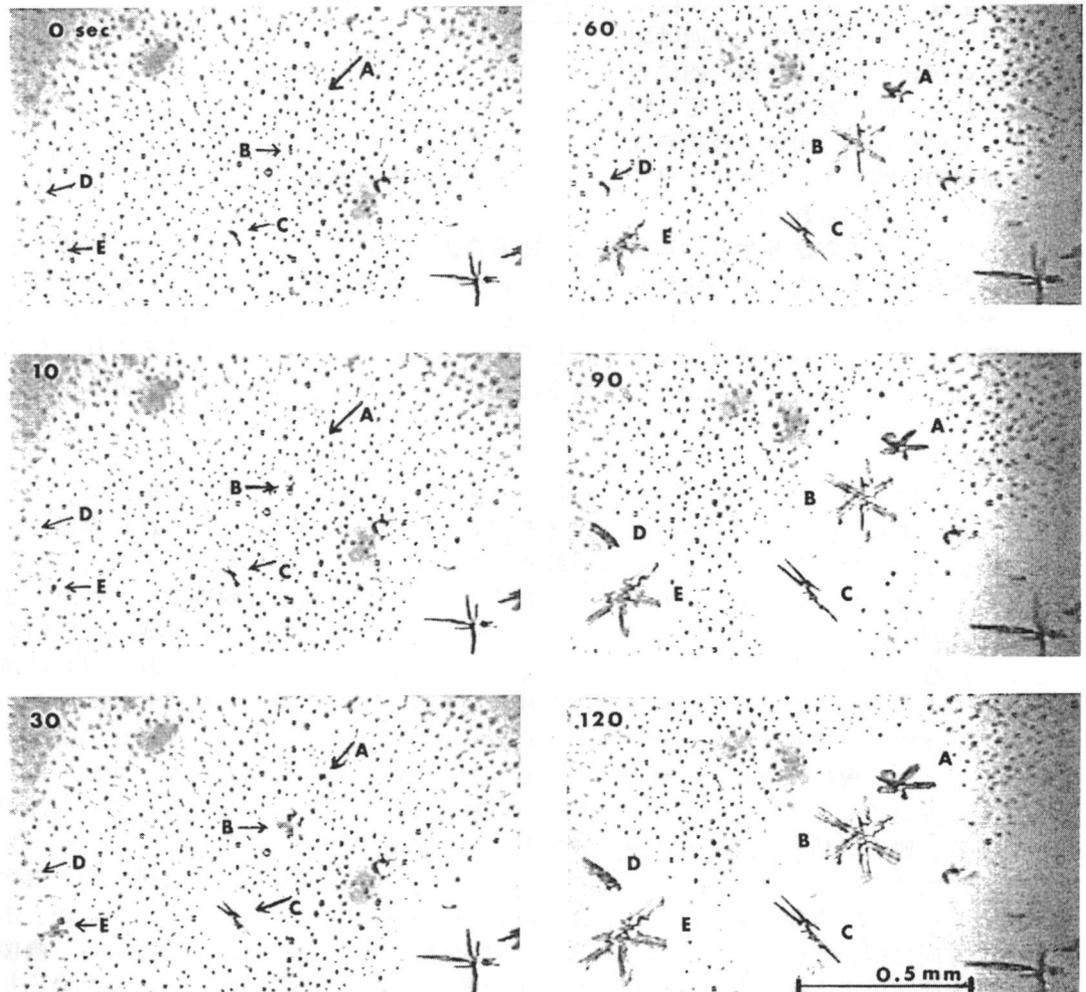


図2 雪結晶の生成過程 (左上の数字はBの結晶の成長を基にした時間)

が、これが樹枝状結晶の成長を促しているということは考え難い。すなわち、これまでの気相成長の結果では、樹枝状結晶は水飽和を超えた過飽和状態で生成するわけで、この図の場合のように水飽和以下（蒸発が見られるので）からはこのような樹枝状結晶の生成は考えられないことになる。そして、なおかつ上述したような成長速度を考え合わせれば、従来の気相成長とは少し異なった生成・成長機構を摸索する必要があるように思われる。

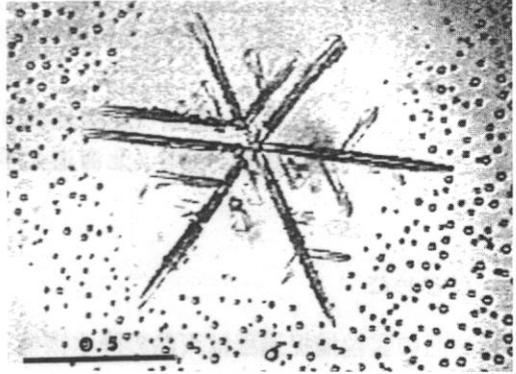


図3 生成された樹枝状結晶

4. おわりに

天然になるべく近い状態で、雪結晶の作製を試みた。合成樹脂の薄膜上に付着された過冷却微水滴から、数分程度の比較的短い時間に雪結晶の形成が見られ、生成の始まる微水滴の特定とそれからの成長過程を顕微鏡観察し、それをビデオに記録することができた。

本実験はこれまでの雪結晶生成の実験とは異なり、種まきや氷晶の挿入によるものではなく、微水滴集合のみからの生成で、核化や成長速度、成長形態の観察などから、従来とは多少異なった雪の生成機構を考える必要があるものと想像された。

今回の実験によって作製された結晶は明らかに「中谷の条件」から外れたものである。実験に用いられた合成樹脂の薄膜が、水の物性に特別な作用を与えないと仮定すれば、得られた結晶も雪ということになり、「中谷の条件」とは矛盾が生じることになる。この矛盾を解消するために、以下のように考えてみた。すなわち、「中谷の条件」が存在するところでは雪は生成するが、雪の生成は必ずしも「中谷の条件」のみによるとは限らないのではないか、つまり、雪の生成に対して「中谷の条件」は必要十分条件であり得るかどうかを検討する余地があるのではないかということである。

今回の実験はその緒についたばかりで、上記のようなことを述べるのは余りにも無謀に過ぎるのではないかと後悔が残り、また提起した問題の重さに押し潰されるのではという不安も一杯である。ただ、次の世代が多少とでも好奇心を持って関心を示してもらえば捨石の意味にもなると考え、ここに愚見を呈した次第である。

参考文献

- 中谷宇吉郎 1946 「雪の研究」 岩波書店
 高橋 勲 1986 「雲の物理」 東京堂出版
 H. R. Pruppacher, J. D. Klett 1978
 Microphysics of Clouds and
 Precipitation
 D. Reidel Publishing Company
 小林禎作 1980 「六花の美」 サイエンス社
 黒田登志雄 1984 「結晶は生きている」 サイエンス社