

## 雪の結晶は氷晶核の必要なく生成する

### Snow crystals are formed without ice nuclei

油川 英明<sup>1,2</sup>

Hideaki Aburakawa<sup>1,2</sup>

Corresponding author: abu440407@yahoo.ne.jp

Snow crystals are commonly believed to be formed from ice nuclei. However, it has been shown that the number of ice nuclei observed in the natural atmosphere is extremely small compared to the number of crystals in actual snowfall. Since this discrepancy is due to the special nuclei assumed from the experiment of the artificial snow crystal, we attempt to resolve the discrepancy in this report by obtaining the formation of snow crystals directly from super cooled water droplets like as cloud droplets.

#### 1. はじめに

雪の結晶は水蒸気が氷点下において特別な核、つまり氷晶核に昇華して成長するもの<sup>1)</sup>とわられてきている。この氷晶核は昇華核とも呼ばれ、今から百年以上も前に「大陸漂移説」の提唱で著名なウェーゲナー (1911) が、グリーンランド探検の際に低温下での過冷却霧のなかに氷晶を見出し、これは特別な核、つまり氷晶核により生成するものと想定した。そして、氷晶核の物質としては水蒸気が昇華して結晶が成長するということから、氷と同じ六方晶系の石英を挙げている<sup>2)</sup>。

その後、中谷<sup>1)</sup>は人工雪の実験で、他の繊維ではなく、特別に兎毛へ雪の結晶が成長したことから、兎毛の特質が雪の結晶を成長させるとみなした。そして、天然ではそれに相当するものを「ある種の核」と称してその調査を行い、中谷の指導の下に Kumai<sup>3)</sup>が電子顕微鏡により雪の結晶の中心部に核を見出し、その物質を粘土鉱物と特定した。Kumai は同時に、雪の結晶の枝の部分には核の粒径よりもはるかに微細な無数のチリ、つまり凝結核をも見出している。なお、人工雪が昇華成長とした兎毛や天然の雪の結晶から見出された粘土鉱物などの核は、いずれも六方晶系の物質ではない。

さらに、氷晶核の調査は実際の大气について行われ、また、氷晶生成のための効果的な核の物質が探求されてきている。天然の大气の中に含まれる氷晶核の調査は種々の測定装置により行われ、氷晶核の主な物質としては中国大陸からの黄砂や一般的な火山灰、粘土鉱物などが観測されてい

る<sup>4)</sup>。そして、特筆すべきことは、氷晶核の測定装置による核の測定個数についてであるが、大気 1 リットル当たり 1~2 個ほどで降雪結晶数の  $1/10^4$  となっており、大気に浮遊するエアロゾルの  $1/10^6$  程度といわれている。

大気中におけるこのような氷晶核数の不可解な現象を解釈するために、核の物質の温度効果や昇華核に加え凍結核などを含めた氷晶形成核が考えられてきている。しかし、核の数に関わる不可解な現象はこれらの導入によっても直ちに解消されることにはならないようである<sup>5)</sup>。

一般に、調査研究と天然の現象との間に明らかな相違が見られる場合、調査研究をはじめに戻し、天然に即した研究方法により、その相違点の解消を図るべきであると考ええる。このようなことから、本稿においては、天然の雪雲を構成している過冷却微水滴により、氷晶核によらずに雪の結晶が生成することを示し、いわゆる氷晶核なるものは必要がないことを述べるものである。

#### 2. 過冷却微水滴から生成する雪の結晶

##### 2. 1 実験の方法

中谷は、「雪の研究」<sup>1)</sup>の緒言冒頭において以下のように述べている。すなわち、「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。つまり、雪の結晶が生成するためには「或る種の核」すなわち「氷晶核」と水蒸気の「昇華作用」が不可欠であるということである。この後の雪の研究はこれを前提として行われ、「氷晶核」についてもこの人工雪

<sup>1)</sup> 日本雪氷学会 北海道支部

<sup>2)</sup> NPO 法人雪氷ネットワーク

Hokkaido Branch, the Japanese Society of Snow and Ice  
NPO Network of Snow and Ice Specialists

の実験により実証されたものとして自然大気に関する調査が行われてきた。

ところで、天然の雪雲は過冷却の微水滴、すなわち雲粒により満たされており、このような中で雪の結晶が昇華成長するとした場合、水蒸気量はせいぜい水飽和の領域であることから、中谷ダイヤグラムにおいて示されているように樹枝状結晶などの一般的な雪の結晶を成長させるような昇華作用は期待できないことになる。つまり、天然の雪の結晶は、水蒸気の昇華とは異なる作用により雪雲内の雲粒の集まりから生成すると考えなければならないわけである。

雪雲の雲粒は、一般には大気中に無数に存在するエアロゾルを凝結核として、水蒸気が上昇して冷却され、飽和の後にはこれに凝結し、冬季であれば過冷却微水滴の雲粒が形成される。雲粒は、粒径が  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  であれば  $-20^\circ\text{C}$  ほどでも安定的に微水滴として液相の状態が保持される。

過冷却微水滴から氷晶を生成させるためには、上記のような微水滴の凝結過程とその安定的な過冷却の状態を破るためのトリガーが肝要であると考えられ、以下のような過冷却微水滴による雪結晶の作製実験を行った。

図 1 に実験装置の概略を示す。この図において、顕微鏡と光源を除いて、装置全体は二重の断

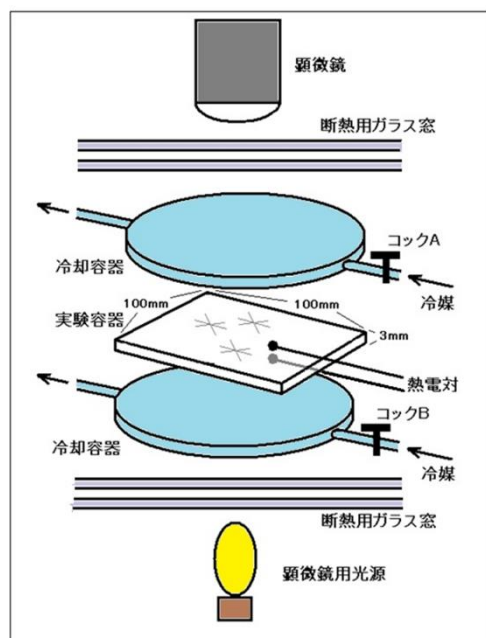


図 1 雪の結晶の作製装置。雪の結晶は、上下の円盤型冷却容器（青色）に挟まれた実験容器内の過冷却微水滴から生成して成長する。

熱用ガラス窓および断熱材で包み込み、常温の室で実験が行えるように組み立てられている。

実験の方法は、まず、厚さが  $1\ \text{mm}$  で  $10\ \text{cm}\times 10\ \text{cm}$  のアクリル板を 2 枚準備し、それにポリエチレンラップを貼り付け、その上に吸入用噴霧器で蒸留水の微水滴を一樣に散布する。そして、別途準備しておいた  $1\ \text{mm}$  厚さの細い枠を上記の 2 枚のアクリル板で挟み、これをラップで包んで固定して厚さ  $3\ \text{mm}$  ほどの箱状の実験容器とする。

次に、この実験容器の外面に熱電対のセンサーを取り付け、それを冷媒が流出入する二つの冷却容器で挟み、これらを断熱材で囲んだ後に顕微鏡と光源をそれぞれ配置する。

そして、上面の冷却容器のコックは閉じて冷媒の流入を止めて室温 ( $+20^\circ\text{C}$  ほど) を保ち、下面の冷却容器のコックは開けたままで冷媒を循環させ、その温度を制御する恒温槽の設定温度を  $-5^\circ\text{C}$  にして稼働する。

このままで数十分ほど経過すると、実験容器の上面の微水滴はほとんど蒸発して下面の水滴へ凝結する。このような状態になったなら、冷媒の恒温槽の温度を  $-15^\circ\text{C}$  ほどに設定し、実験容器の上面に取り付けた冷却容器のコックを開き、下面と同じ冷媒の流入を開始する。

実験容器の上面と下面が同じ温度になった時点から、水蒸気が上面に附着しているチリなどへ凝結し、過冷却微水滴が生成しはじめる。なお、この時の両面の温度は  $-5^\circ\text{C}$  以下の氷点下である。このままで  $20\sim 30$  分経過すれば、実験容器の上面の過冷却微水滴は  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  ほどに成長し、所々でこの微水滴が直接に氷晶（板状結晶）化し始める。この時の温度は  $-15^\circ\text{C}$  ほどである。

また、柱状結晶を成長させるときは、実験容器の上下面の温度を  $-5^\circ\text{C}$  のまま  $20$  分ほど保って微水滴を  $20\ \mu\text{m}$  ほどに成長させ、その後、上下面の温度を  $-7^\circ\text{C}$  ほどにして水蒸気の凝結を少し促進すれば、これがトリガーとなって実験容器の上面の微水滴は柱状結晶へと氷晶化する。

この実験でポイントとなることは、氷晶化する微水滴は、水蒸気の凝結が氷点下でゆっくりと行われて過冷却することであり、そして、次に、その微水滴に対してやや急激に水蒸気を凝結させて過冷却状態を破ることで、これにより過冷却微水滴から氷晶を生成させることができる。

実験容器に対しては特にシーディングなど行っておらず、実験室内のチリ以外には混入物が考

えられないことから、上記のような氷晶の形成は天然のチリ、つまりはエアロゾルによるもので、氷晶核などの特別な核は必要がない。

## 2. 2 雪の結晶の生成過程

図1に示した実験装置により、過冷却微水滴から雪の結晶が生成する過程をビデオ動画に撮影した。また、定性的ではあるが、チリの多寡と雪の結晶の生成数についても比較実験を行った。それらの結果について以下に示す。

図2は、過冷却微水滴から雪の結晶が成長する過程を撮影した動画から、各々の経過時間における静止画を抽出したものである。図2の①は、氷晶が形成される直前の画像で、過冷却微水滴は $30\mu\text{m}$ 内外のものが分布している。このような粒径の分布は天然の雪雲の雲粒にも一般的にみられることである。

図2の②は1分、③は2分の時間が経過した画像で、氷晶化した結晶の主枝は近くの微水滴を捕捉して成長し、また、その捕捉箇所から側枝を成長させている様子も見られる。主枝は昆虫の触手のように微水滴を捕捉する。図2の④は4分の時間が経過した画像で、ほぼ六花に成長している。周囲の微水滴は、氷晶との飽和水蒸気の差により蒸発するものも見られる。六花の中央は、氷晶化した微水滴の形がやや膨張した円形状になっているが、天然の結晶においても中心部に円形の文様がしばしば見られることから、雪の結晶は、このように過冷却微水滴、つまり雪雲内の雲粒により生成、成長するものと推定される。

図2の④の結晶は成長を続けて、数分後には径が $1\text{mm}$ を超えるまでに達している。この実験に

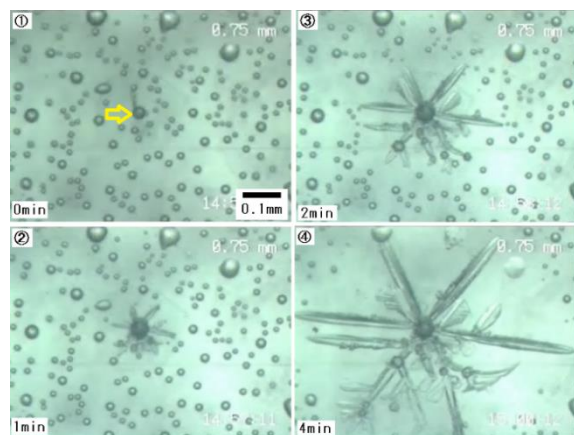


図2 過冷却微水滴 (図の矢印,  $30\mu\text{m}$  径) からの樹枝状結晶の成長。数分で $1\text{mm}$ 以上に成長。実験温度は $-15^{\circ}\text{C}$ 。

よる氷晶の成長は、中谷の人工雪<sup>1)</sup>と比較しても速いが、何よりも樹枝状結晶の成長が水蒸気の過飽和を要しないということは特記される。

図3は、やや大きめの過冷却微水滴が、はじめは柱状結晶に氷晶化し、その後に樹枝状結晶へと成長する過程を、結晶の横方向から撮影した画像である。温度は $-15^{\circ}\text{C}$ とほぼ定常であるが、先ず、角柱の生成がなされ、そして二重構造の六花へと成長する。このような結晶は、天然の雪の結晶においてもよく見られる形態であるが、中谷ダイヤモンドには必ずしも則していない。

図4は、 $-5^{\circ}\text{C}$ での過冷却微水滴の結晶化を示したもので、近傍の微水滴とも接触して柱状へと氷晶化し、角柱の集合を形成している。

図5は、過冷却微水滴が上端から伸びてきた樹枝状結晶の枝先の接触により氷晶化する過程を

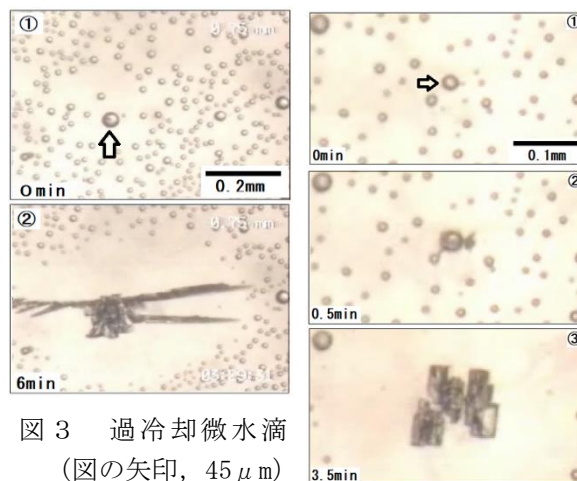


図3 過冷却微水滴 (図の矢印,  $45\mu\text{m}$ ) が柱状結晶に氷晶化し、そこから樹枝状結晶へ成長の二重構造の結晶。  $-15^{\circ}\text{C}$ 。

図4 過冷却微水滴 (図の矢印,  $30\mu\text{m}$ ) からの柱状結晶の成長。実験温度は $-5^{\circ}\text{C}$ 。

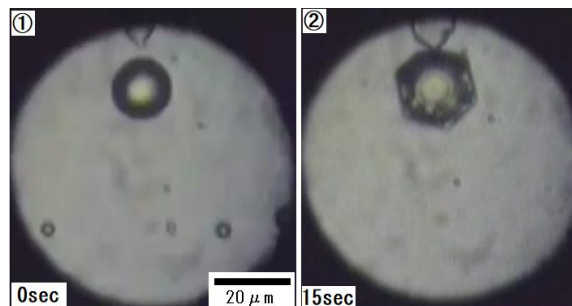


図5 結晶の先端の接触により六角形状に結晶化する過冷却微水滴。この後、六花に成長することから、雪片形成の一因とみなされる。実験温度は $-15^{\circ}\text{C}$ 。



示したものである。過冷却微水滴は、このように独立した氷晶になるか、図2のように母結晶に取り込まれるか、あるいは氷球状に凍結して霰を形成するかなど、多様な形態を示す。これは、過冷却微水滴の凝結形成の過程に依存している。

次に、天然の大気中に一般的に見られるエアロゾルが氷晶の生成を促進することについて、定性的ではあるが、図1の実験装置により検証を試みた。つまり、氷晶を作製する実験容器について、通常はラップを貼り付けてから即座に容器を組み立てるのであるが、この場合はチリを多く含んだ実験容器を得るために、実験容器を構成するアクリル板にラップを貼り付け、それを一昼夜ほど室内にさらしてから容器を組み立てた。その後これまでと同様の実験を行ったわけである。その結果を図6に示す。

図6の左右の写真を比較してみると、右のチリを多く含んだ実験容器の方がはるかに氷晶数の多いことがわかる。このことから、チリ、つまりエアロゾルによる氷晶の生成効果が示されていると言える。

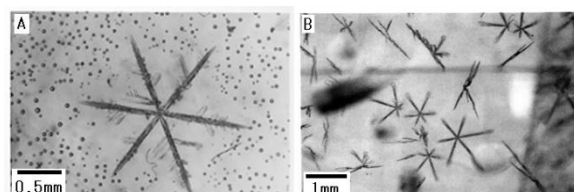


図6 チリを多く含んだ容器による実験結果（右）。写真の斑点や線分は容器の付着物。左は通常の実験による。温度は $-15^{\circ}\text{C}$ 。

### 3. 降雪機構に関する若干の考察

これまで述べてきた実験結果について図7のようにまとめ、これをもとに新たな降雪機構を構想してみたので、以下に概説する。

一般に、地表や海面などから蒸発した水蒸気は、上昇するとともに冷却され、飽和に達した後はその気塊に含まれるエアロゾルによって水蒸気が凝結して雲粒が形成される。夏季においては、水蒸気の蒸発が盛んになれば、雲粒は成長して併合し、雨滴となって落下する。他方、冬季においては、上昇気流が氷点下においてエアロゾルへの水蒸気の凝結により過冷却雲粒が形成された場合、図7に示したように、その凝結速度に応じて、過冷却の雲粒は各々の結晶形へと固相化する。この時、雲粒を固相化させるトリガーは凝結する水蒸

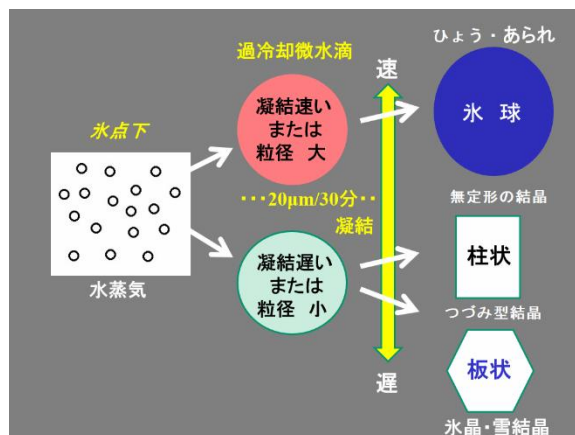


図7 過冷却微水滴（雲粒）の凝結速度と生成結晶の形態。

気そのもので、 $1\mu\text{m}$ ほどの大きな凝結核<sup>3)</sup>を含んだ不安定な雲粒から先に結晶化し、微細な凝結核の雲粒は比較的安定して微水滴の状態を保持する。冬季の雪雲が氷晶と過冷却雲粒とを共存しているのはこのためである。そして、生成した氷晶は近傍の雲粒を捕捉して成長し、あるいは接触した雲粒が結晶化して複数の結晶による雪片を形成することになる。

また、霰は多数の過冷却雲粒が氷晶へ氷結して形成されたものであるが、その雲粒は、図7のように過冷却であっても結晶化せずに氷球となるものである。霰が水蒸気の蒸発が活発な海辺の降雪などに多く含まれるのはこのためである。

### 4. おわりに

これまで長い間、天然の大気における氷晶核の探索が行われてきたが、本稿において述べたように、雪の結晶は過冷却雲粒から直接的に生成することから、氷晶核を追い求めることはもはや必要がないものと言える。

### 【参考文献】

- 1) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 岩波書店, pp.161
- 2) 磯野謙治, 1982: 1. 雲の形成と降水機構の研究の発展—微物理過程を中心として—, 天気, **29**, 477-490
- 3) Kumai, M., 1951: Electron-Microscope Study of Snow-Crystal Nuclei, J. Meteor., **8**, 151-156
- 4) 田中豊顕, 1974: 雲の氷晶化過程と氷晶核, 気象研究ノート, 第122号, 85-134
- 5) 當房 豊, 2019: 混相雲内でのエアロゾルの氷晶核としての役割, 大気化学研究, 第41号, 1-7