

## 雪結晶の表面に形成された氷晶状の凍結雲粒について

### On frozen cloud droplets like as hexagonal ice crystals formed on the snow crystal

油川英明<sup>1</sup>

Hideaki Aburakawa<sup>1</sup>

Corresponding author: abuhide@nifty.com

雲粒付雪結晶の凍結雲粒のなかに氷晶状の小結晶が見いだされた。これらの小結晶は過冷却の雲粒が凍結・結晶化することにより形成されたもので、雲粒に見立てた過冷却微水滴の凍結実験により確かめることができた。さらに、過冷却微水滴つまり雲粒は、その形成過程や粒径などにより種々の形態に凍結・結晶化することから、雪の結晶全般が過冷却雲粒から液相成長することによって生成するものと理解される。

#### 1. はじめに

雪の結晶は、一般に、形状が整ったものよりもその表面に雲粒が凍結付着したいわゆる雲粒付結晶が多く見られる。特に、低気圧の通過に伴う降雪などではこの種の結晶が卓越する。このような雪雲は過冷却微水滴の雲粒で満たされていることから、それが雪の結晶に捕捉されることにより氷粒状に凍結して、雪の結晶は雲粒付きになるものと見なされてきている<sup>1)</sup>。

ところで、当然のことながら雪の結晶は雪雲がなければ生成されず、そして、その雪雲は常に雲粒で満たされているわけである。それが、ある時には雲粒の付着がない形の整った六花が降り、またある時には相当数の凍結雲粒が付いた結晶や霰が降ってくる。そしてまた、一降雪時においてもそれらの結晶が交互に降ってくるなど、天然では通常のことであっても、人工雪を基にした雪結晶の気相成長説<sup>2)</sup>では理解が困難な降雪現象が日常的に起こっていることになる。

さて、雪の結晶に付着した凍結雲粒は、多くの場合、微小な氷粒状であるが、今回の観測では、事例は余り多くはないが、雲粒付結晶の凍結氷粒のなかに六角形状に結晶化した氷晶状のものが見られた。このことは、前述の雪結晶の気相成長説に関わり、天然雪と人工雪との結晶成長のくい違い、つまり矛盾として<sup>2)</sup>、極めて興味深い現象であると考えられる。

これらのことについて、これまでの野外観察の事例や室内における過冷却微水滴の凍結実験をもとに考察を行ったので、ここに報告する。

#### 2. 雪の結晶の表面に見られる氷晶状の小結晶

雪の結晶に付着した凍結雲粒は、多くの場合、その形態は氷粒状である。ただ、希にはあるがそのなかに六角形状に結晶化した小結晶が混在している場合が見られる。それを図1に、そして、この結晶に見られる氷晶状の小結晶部分を拡大し、図の下部にそれぞれのA、Bとして示す。

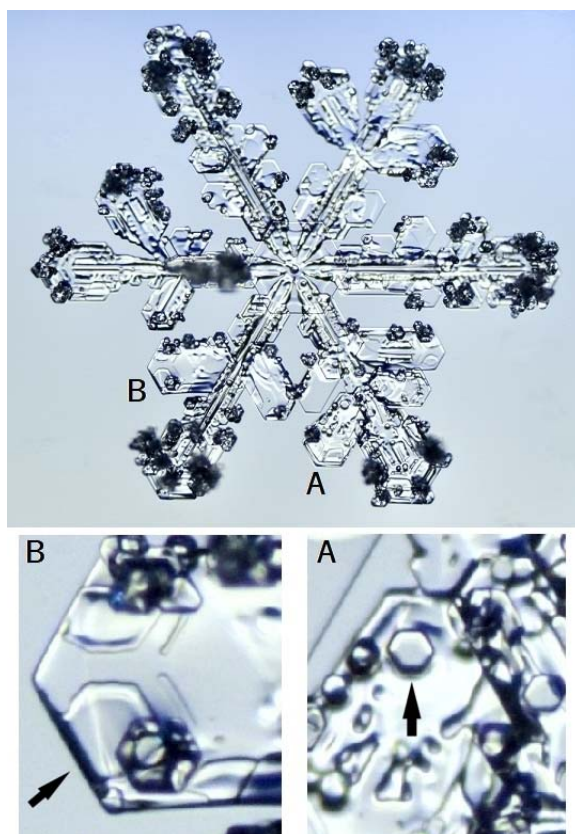


図1 氷晶状の凍結雲粒（図中の矢印）が付着した雪結晶と拡大された氷晶状結晶

<sup>1)</sup>NPO法人 雪氷ネットワーク

NPO Network of Snow and Ice Specialists

図1に示された雪の結晶は、2020年3月3日に大雪山系旭岳の麓で撮影された樹枝状結晶で、3mmほどの径のものである。このときの降雪は、前線を伴う低気圧が北海道の中央部を西から東へと通過したことによるもので、雲粒付結晶がほとんどを占めていた。そして、これらの雲粒付結晶のなかに、六角板状のいわゆる氷晶状の小結晶が凍結雲粒のなかに混在していることが見いだされた。それが図1に示された結晶である。

### 3. 雲粒の凍結による小結晶の形成

図1のAにおいて、矢印が付された小結晶は明らかに六角板状を示しており、また、Bの矢印が付された小結晶は母結晶との縁が一体化し、その横にある小結晶やAの場合よりも母結晶への同化が見られる。

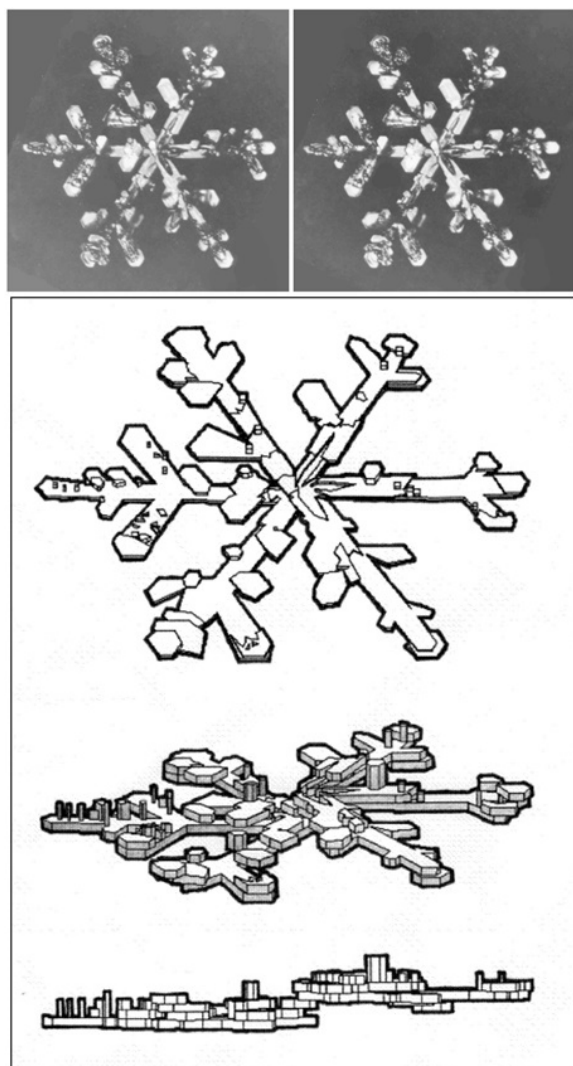


図2 雪の結晶の立体図。図の上部は左眼用、右眼用の立体写真。図の下部は0°、45°、90°の回転角による概念図

さて、これらの小結晶、つまり小角板の成因であるが、種々の実験及び考察により、これらは過冷却微水滴の雲粒が直接的に凍結・結晶化したものであろうという結論に至った。すなわち、これらの小角板は母結晶とは形態的に独立しており、母結晶の表面文様の一部であるとは言い難い。また、この小角板は独立的であるが、それらが他所で個別に生成し、そして母結晶に付着したものであるとするには、各々の小角板の結晶方位がほとんど母結晶と一致していることから、これらは母結晶上で、母結晶の影響を受けて形成されたと見なされるわけである。

他方、中谷の説りに従い、特別な核、つまり氷晶核が母結晶に付着し、そこに水蒸気が供給されて小角板が成長するとしたとき、いくつかの矛盾が生じることになる。ひとつには、このような小角板が通常の六花型結晶などには見られないことから、母結晶への核の付着が雲粒付結晶の場合に限られることになり、それは余りにも限定的に過ぎること、そして、例えば氷晶核が付着したとしても、水蒸気の供給はその核だけに限られるわけではなく、母結晶全体に及ぶことから、また、水蒸気の凝結は異物の核物質よりも、氷本体の母結晶の方が分子結合的に有利であることから、母結晶全体の成長がなされとしても、核の部分だけが水蒸気の供給により特段に成長するということが極めて不自然であると考えられるわけである。さらに、母結晶の全体的な箇所において小結晶が独立的に成長している例も見られる。それは図2に示されたような結晶である。

図2は、図1の結晶と同様の場所で以前に撮影された暗視野による実体顕微鏡の立体写真で、図の上方の左と右の写真はそれぞれ左眼用と右眼用のものである。そして、これらの写真により結晶を立体視できることから、その視覚的構造をデータ化し、コンピュータにより各々の方向からの概念図を描いたものが下方の図である。この図に示されたように、母結晶は樹枝状結晶の平板結晶であるが、その表面からは角柱状の小結晶が独立的に成長していることが分かる。先の中谷の氷晶核付着説では、これらの小角柱を成長させるために水蒸気が選択的に氷晶核へだけ供給されたことになり、それは余りにも不自然なことである。

以上のようなことから、図1あるいは図2の樹枝状結晶に付着した小結晶は、雪雲を構成する雲粒が母結晶上で直接的に成長したのと考えら

れることから、以下のような過冷却微水滴の凍結実験により考察を行った。

#### 4. 過冷却微水滴の凍結・結晶化

過冷却微水滴を雲粒に見立ててその凍結実験を行い、上記の小結晶の形成について考察を行った。実験結果の一例を図3に示す。

図3は、 $-15^{\circ}\text{C}$ の温度における実験で、ビデオ撮影による動画から各々の画面を抽出し、最初の画面を①とし、各画面に各々の順番を付して時間の経過を右下に秒数で示している。最初の画面のAとBの微水滴に着目すれば、Aは隣りの結晶の接触によって六角形状に結晶化し、そして枝を伸ばしてBを取り込み、さらに成長を進行させている。このような微水滴の取り込みは画面の下方の枝にも見られる。ここで、微水滴Aは小角板の形状を示して凍結・結晶化していることから、先の樹枝状結晶に見られる図1の小角板Aも同じように雲粒が結晶化したものと見なされる。

また、水蒸気の凝結による過冷却微水滴の形成が比較的急激な場合、あるいは $-10^{\circ}\text{C}$ よりも高い温度で凍結する場合、その微水滴は角柱状に凍結・結晶化する（以下に記すURLのフォルダ内ファイル「柱状（ $-8^{\circ}\text{C}$ ）」を参照。動画は10倍速で、画面の横幅は $0.75\text{mm}$ 、実験温度は $-8^{\circ}\text{C}$ ）。前節で述べた小角柱は、樹枝状結晶が比較的暖かい温度の雪雲に遭遇して過冷却雲粒を捕捉し、それが結晶化したものと推察される。さらに、図3の過冷却微水滴B、あるいは画面下部の微水滴は、母結晶に取り込まれてその痕跡を残すことなく、

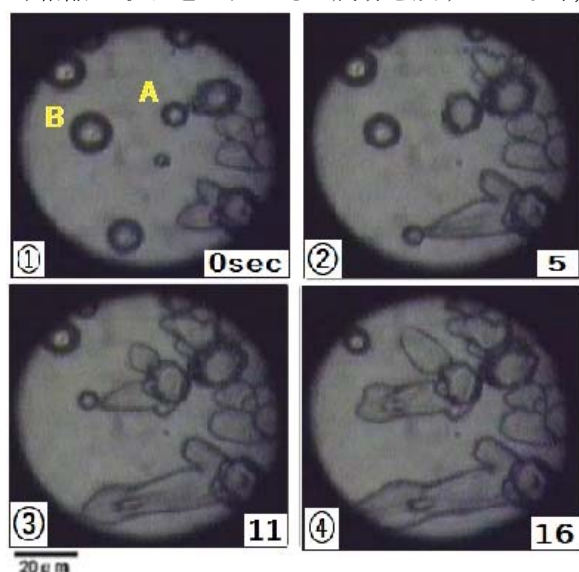


図3 過冷却微水滴の凍結・結晶化。実験温度は $-15^{\circ}\text{C}$ 、各画面右下の数は経過秒数

母結晶の成長に寄与している。

このように過冷却微水滴は、単に氷球状に凍結するだけでなく、凝結形成の過程に応じて種々に凍結・結晶化するわけであり、雪の結晶は雪雲のなかで過冷却雲粒から生成し、そして雲粒を捕捉して成長すると言える（これを「液相成長説」と呼称）。このとき、成長する雪の結晶は、捕捉する雲粒の凝結過程とその粒径に応じた形態に成長するものと考えられる。

なお、本実験の方法及び図3の動画ファイルは下記のURLで閲覧が可能である（「北海道の雪氷\_39号」フォルダ内の「雲粒の結晶化」）。

<https://1drv.ms/f/s!As9IcXMRuXdAnThR8E5JU2MPuKG2>

#### 5. 過冷却微水滴の凍結形態について

これまでの実験および野外観察等の結果から、過冷却微水滴の凍結形態に関する仮説として、図4にその概念図を示す。

図4は、雲粒に見立てた過冷却微水の凍結形態について、その粒径と水蒸気の凝結過程（氷点下での凝結速度）とを因子として、各々を座標軸に示したものである。図4において、曲線のグラフ $L_0$ を越えた領域は、過冷却微水滴が氷球状に凍結することを示している。天然では雲粒付結晶や霰などが形成される領域で、先述の前線を伴う低気圧による雪雲の状態として示される。そして、図の曲線 $L_0$ と $L_2$ に挟まれた領域は過冷却微水滴が氷晶状に結晶化することを示しており、さらに、この領域は曲線 $L_1$ により柱状と板状の結晶成長域に分けられる。また、曲線 $L_2$ 以下の領域は過冷却部水滴が捕捉された母結晶と同化し、それを

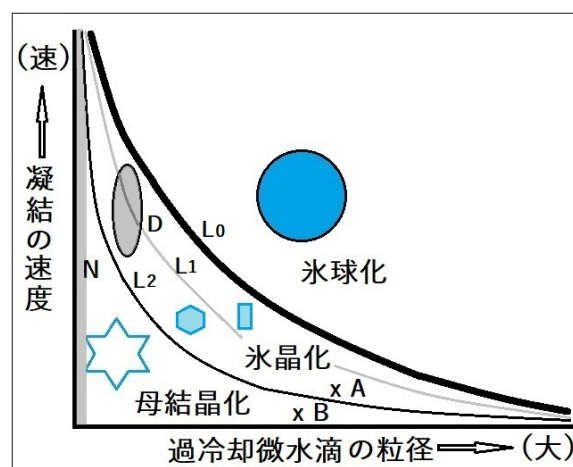


図4 雲粒に見立てた過冷却微水滴の凍結形態に関する概念図。



成長させることを示している。

図4に示されたAとBの×印の点は、図3のAとBの過冷却微水滴の場合で、各々の成長形態を示している。そして、図の縦軸に沿った細長いNの領域は、中谷<sup>3)</sup>による、粒径が $1\sim 2\mu\text{m}$ ほどの過冷却微水滴が母結晶の氷体表面に瞬時に取り込まれることや、人工雪の作製装置内に浮遊して結晶を成長させることについて示している。さらに、図のDは、ダイヤモンドダストの生成実験において小角板と小角柱の氷晶が同時に成長する現象<sup>4)</sup>を領域的に示したものである。

図4の曲線のグラフ $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ は、いずれも厳密な区分ではなく、その遷移的な結晶の形成も見られるわけで、例えば、つづみ型結晶は $L_1$ の遷移的な成長により、あるいは、特異な20面体の氷晶<sup>5)</sup>は $L_0$ の境界域で成長したのではないかと推察される。このようなことから、天然の雪雲は多様な結晶を生成できるものと理解される。

過冷却微水滴の凍結形態を決める因子は、この他に温度や静電気などが考えられるが、これらの因子の効果に関しては今後の研究課題である。

## 6. 雪の結晶の表面文様

雪の結晶は多くの場合、今回のような写真撮影法によって、その表面に特有のレリーフ文様や気泡、あるいは虹色の筋などが写し出される。その一例を図5に示す。この写真は、顕微鏡による撮影の照明にU字型の青色フィルターを用いたもので、斜光照明の効果が得られ、結晶表面のレリ



図5 U字型フィルター法により顕微鏡写真撮影がなされた雪の結晶。

ーフ文様などが強調されて見える。これらの文様は、水蒸気の凝結による水分子の凝着というミクロな現象の結晶成長<sup>6)</sup>によるとするよりも、過冷却微水滴のマクロな液相成長として、図4に示されたような種々の因子による氷晶の形態形成によって理解されるべきであると考えられる。

## 7. おわりに

雲粒付雪結晶の表面に小角板や小角柱の氷晶状結晶が付着していることが見いだされた。これらの小結晶は過冷却の雲粒が氷晶状に凍結・結晶化したもので、雪の結晶の気相（昇華）成長説<sup>7)</sup>によっては理解し難い現象である。つまり、雲粒付結晶を含めて雪の結晶全般が雪雲内において過冷却の雲粒から生成し、周囲の雲粒を捕捉して成長するという液相（雲粒）成長説<sup>6)</sup>の方が妥当であるように判断される。

ところで、雪の結晶は、一般に底面あるいは柱面の一方が卓越した板状乃至柱状の結晶構造を示しているが、これは分子構造的な氷結晶の平衡形<sup>7)</sup>とは形状的に隔たりが大きく、やはり液相が関与した結晶として考究されるべきであろう。

このようなことから、今後の雪の結晶の研究は、気相成長の絶対的な条件である水蒸気の過飽和現象という天然とは乖離した条件によるものではなく、液相成長説を基にして現実の降雪現象に関わり得る方向を探る必要があると考えられる。

本研究の調査は、NPO 法人雪氷ネットワークの2019年度事業活動として行われた。

## 【参考文献】

- 1) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 岩波書店, 東京, pp.161.
- 2) 油川英明, 2014: “中谷現象”としての人工雪の生成, 北海道の雪氷, **33**, 113-116.
- 3) Nakaya, U., 1954: Snow Crystals-Natural and Artificial-, Harvard Univ. Press, pp.510.
- 4) 小林禎作, 1983: 冬のエフェメラル, 北海道大学出版会, 札幌, pp.39.
- 5) 小林禎作, 1980: 六花の美, サイエンス社, 東京, pp.249.
- 6) 油川英明, 2018: 「雪の結晶は二つと同じものがない」のはなぜか? 北海道の雪氷, **37**, 55-58.
- 7) 黒田登志雄, 1984: 結晶は生きている, サイエンス社, 東京, pp.265.