

## 雪結晶の形態的な特徴について — 枝の文様が異なる六花の事例 —

### On the characteristic formation of snow crystals -An example of a crystal having six branches of different patterns-

油川英明 (NPO 法人 雪氷ネットワーク)  
Hideaki Aburakawa

#### 1. はじめに

樹枝状結晶などの板状雪結晶は、「裏」面と称される結晶の内面に特有のレリーフ文様が形成されている<sup>1)</sup>。そして、その文様は、いわゆる六花の結晶の場合、六つの枝が対称的でほとんど同じ形態であるが、それは、天然の雪結晶が雪雲内を回転しながら落下・成長するためであるとみなされており<sup>2)</sup>、一般には妥当なことと理解される。ところが、時として六花にはレリーフ文様の枝とそのような文様の無い平坦な枝とが共存したいわゆる文様混合型の結晶が見られる。

雪結晶が水蒸気の昇華成長によるものとした従来の気相成長説<sup>2)</sup>に則るならば、この文様混合型結晶は、結晶の周囲の水蒸気分布が過飽和かつ不均等という状態で、さらに、結晶が成長するまでしばらくの間、その状態が保持されていなければならないことになる。しかし、天然においてそのような現象を見出すことは極めて困難であろう。つまり、雪結晶の気相成長説については、霜の結晶も同様であるが、これまで自明とされてきたこと、例えば昇華ということなどについて具体的に検証し、天然の現象に沿うように検討される必要があるのではないかということである。従来の学説の不合理性をそのままに甘受することは、研究の方向を逸するばかりでなく、その理念をも損なう恐れがあるものと危惧される。

本報告においては、上記の文様混合型の雪結晶を紹介し、その成因及び形成条件について考察した結果を述べるものである。

#### 2. 文様混合型雪結晶の観察例

いわゆる六花などの板状結晶は、図 1 に示すように、一般には六つの枝のレリーフ文様がほぼ同じように形成されている。このような雪結晶は、前述のように、雪雲内において回転しながら落下・成長してくることにより、結晶の各枝は同じ成長条件によって形づくられてきたものと理解されている<sup>2)</sup>。

しかし、雪結晶のなかにはレリーフ文様の枝とそのような文様の無い枝とが混合した六花も見られる。その一例を図 2 に示す。これは、大雪山系旭岳の麓で観察されたもので、ここではこのような雪結晶を文様混合型結晶と呼称することにする。

図 2 の文様混合型結晶は、レリーフ文様のある枝が上方、無い枝が下方に位置する二重構造の組合せ六花<sup>1)</sup>となっている。なお、この結晶の写真は、図 1 の場合と同様に、被写体である雪結晶には照明の偏りがないように撮影されていることから、枝の

文様の有無は結晶そのものの形態であるとみなして差し支えないであろう。

また、文様混合型の雪結晶は著者以外によっても観察されており、それらをまとめて図 3 に示す。それぞれの結晶において、レリーフ文様の欠損している枝が矢印で示されている。そして、文様のある枝と無い枝の各々がやはり上下の位置関係にあることが各結晶の枝の交差状態から判別できる。なお、図 2, 3 に示された文様混合型結晶は、いずれも文様の有無に関わらず 6 つの枝の外形はみな同じ形態となっている。

### 3. 文様混合型雪結晶の成長について

上述のような文様混合型雪結晶はどのような成長過程を経てきたものであろうか。雪結晶の成長については、前述のように気相成長説<sup>2)</sup>が定説となっているが、その説によれば、このような結晶の成長は、その周囲の水蒸気量が過飽和で、かつ各枝の形態に応じた水蒸気分布が必要になる。しかも、そのような水蒸気の状態は、微細な氷晶から数ミリメートルの結晶に成長するまでの間、一定に保持されていなければならないことになる。このようなことは、天然においてはほとんど存在し得ない現象であると言わざるを得ない。

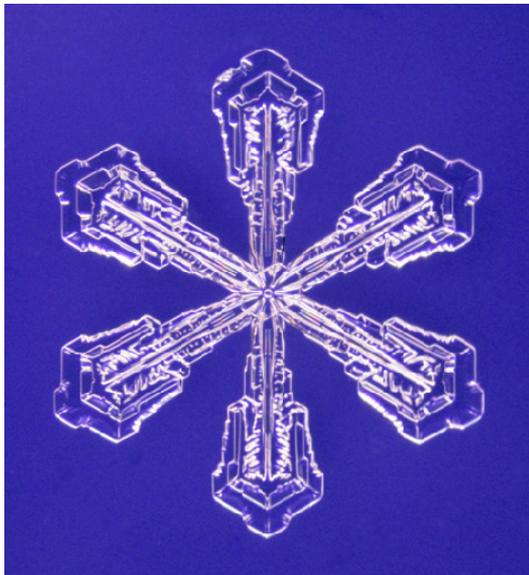


図 1 一般的な六花型の雪結晶。各枝の文様はほぼ同じ形態。

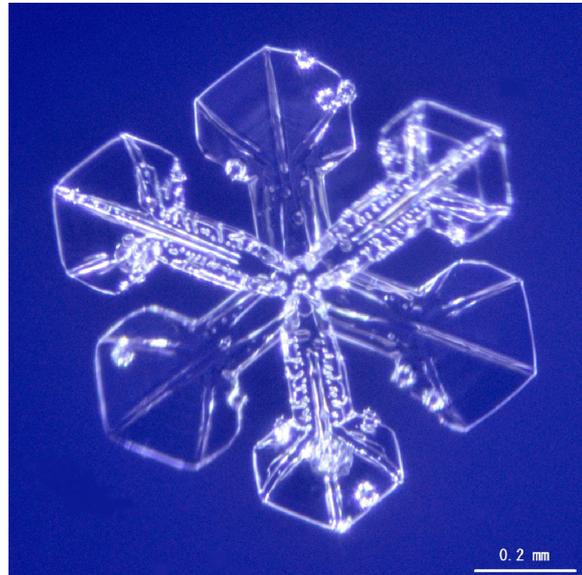


図 2 文様混合型雪結晶。レリーフ文様の枝と文様のない平坦な枝とが上下の二重構造になっている。

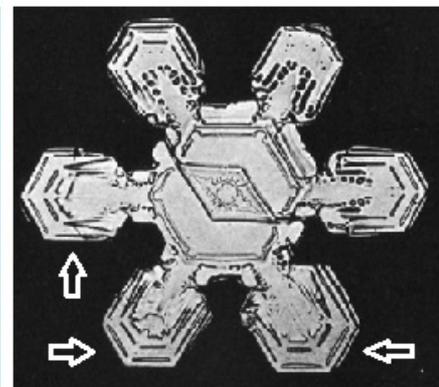
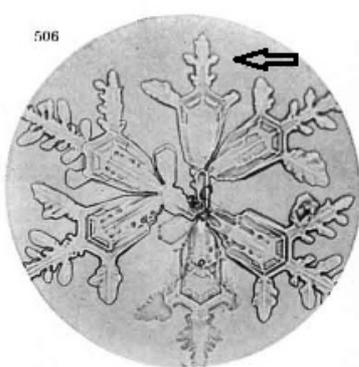


図 3 文様混合型雪結晶の例。図の左よりそれぞれ中谷<sup>2)</sup>、小林<sup>3)</sup>、Bentley<sup>4)</sup>の写真。各結晶の矢印を付した枝はレリーフ文様が欠損している。

ところで、雪結晶の枝の文様は相応の厚みによる凹凸状あるいは階段状の構造によるものである<sup>2)</sup>とすれば、文様混合型結晶の場合、文様のある枝は文様の無い枝と比較して、水分量が多く供給されて厚く成長したことになる。しかし、一つの雪結晶に対してそのような偏りのある水分供給が天然で起こり得るであろうか。それは、水蒸気という気体での供給では非現実的なことであるが、過冷却微水滴つまり一定の形状を有した塊状の形態、今の場合には雲粒による供給ということであれば可能であるように考えられる。実際、天然の雪結晶の一個体についてそのような偏った雲粒の付着現象が観察されているので<sup>2)</sup>、それを図4に示す。

図4の雪結晶は雲粒付鼓型結晶で、それを上面及び側面から撮影した写真である。この図から明らかなように、二重角板の上方が下方のものよりも厚く成長し、また雲粒も多く付着している。そして、二つの角板からは短い針状結晶が成長している。雲粒が結晶を成長させるか否かについてはその凝結生成の条件に因る<sup>5)</sup>ことから、図4の結晶の成長は次のように推察される。すなわち、上方の角板が下方のものよりも多くの雲粒を捕捉し、その雲粒のなかであるものは結晶の角板を厚く成長させ、また、一部の雲粒は針状結晶を成長させ、そして結晶化の条件を有しない雲粒は氷球として凍結付着する。その結果、二つの角板は、それぞれが捕捉した雲粒に応じて厚みを増し、凍結雲粒などを形成することから、それらの差により図4のように不均等に成長したものとみられる。それ故、図2, 3の文様混合型結晶は、上下二重の氷晶の構造をもとに、雲粒による水分の供給に応じて、厚い方は文様の枝、薄い方は平坦な枝として成長した結果であり、また、各結晶の枝の外形がほぼ同じであることから、水分の供給差は文様の形成に関わる程度と推察される。ところで、図4の結晶周辺の雲粒は一般には等方的な分布状態にあるとみなされるが、上記の雪結晶の場合のような雲粒の付着、つまり水分の供給差が何故に生じるのか、以下に考察してみよう。

#### 4. 雪結晶の不均一な成長と帯電現象

雪結晶への偏った雲粒の付着原因のひとつとして、雪結晶及び雲粒の帯電現象が考えられることから、以下のような実験を行った。それは、過冷却微水滴から氷

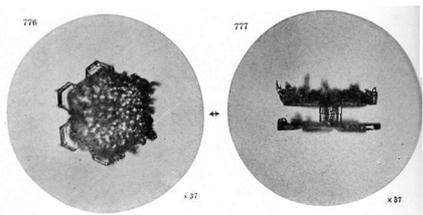


図4 中谷<sup>2)</sup>による雲粒付鼓型結晶。図の左は結晶上面から、右は側面からの撮影。上側の角板が厚く、雲粒の付着も多い。

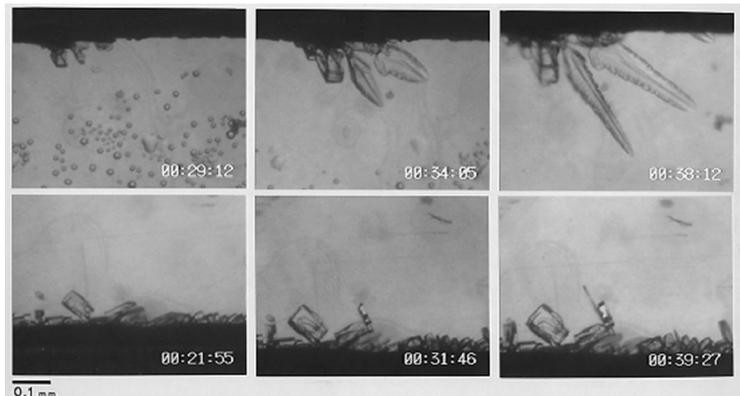


図5 直流電圧を負荷したときの過冷却微水滴の集合と氷晶成長の状態。図の上側の黒帯はプラス、下側の黒帯はマイナスの電極。各写真の数字は時:分:秒で実験の経過時間を示す。図の左側上下の比較から、プラス側に過冷却微水滴が多くなっている。また、結晶の形態は、プラス側では板状、マイナス側では柱状が見られる。実験の温度は $-15^{\circ}\text{C}$ で一定。

晶を生成させる装置<sup>5)</sup>において、その実験容器内に1 cmの間隔で正負の電極を貼り付け、そこに20 Vの直流電圧を負荷したものである。その結果を図5に示す。この図に示されたように、電極の差異により過冷却微水滴の集まり方に違いがみられ、プラスの電極側に比較的多くの微水滴、つまりは雲粒が集積している。そして、氷晶はプラス、雲粒はマイナスに帯電しているとみなされることから、図4の鼓型結晶の雲粒付着について推察するならば、この結晶は上側の角板の上面がプラス、下側の角板の下面がマイナスに帯電していて、雲粒がマイナスということ、上側の角板の上面には多くの雲粒が付着し、下面には雲粒の付着が余り見られないということになる。なお、このような氷晶や雲粒の帯電現象については今後の探求課題である。

## 5. まとめにかえて

文様混合型結晶は、雪結晶が液相から成長すること<sup>5)</sup>の一例証としてとり上げてきたが、雪結晶の液相成長については理論的にも示されている<sup>6)</sup>。それは、結晶の表面には一定の液膜が形成され、その厚さがエネルギー的平衡を保持するように結晶が成長するというものである。ただ、この理論では、氷晶表面を覆う液膜の厚さは水分子数個程度に見積もられ、それはいわゆる疑似液体層と呼ばれてきた。そして、この見積もりは半無限の氷塊表面についてのもので、また、いくつかの因子は仮定の値であった。これに対して、過冷却微水滴からの氷晶成長の実験<sup>5)</sup>では、液膜の厚さは図6に示すように1~2 μmの値が得られた。つまり、氷晶は相応の厚さの液膜に覆われて雲粒を捕捉し、雪結晶へと液相成長をするものであると言える。そして、図6の液膜の盛り上がり帯電による作用であるとするならば、先に述べた文様混合型結晶の成因が一層妥当なものとなるであろう。

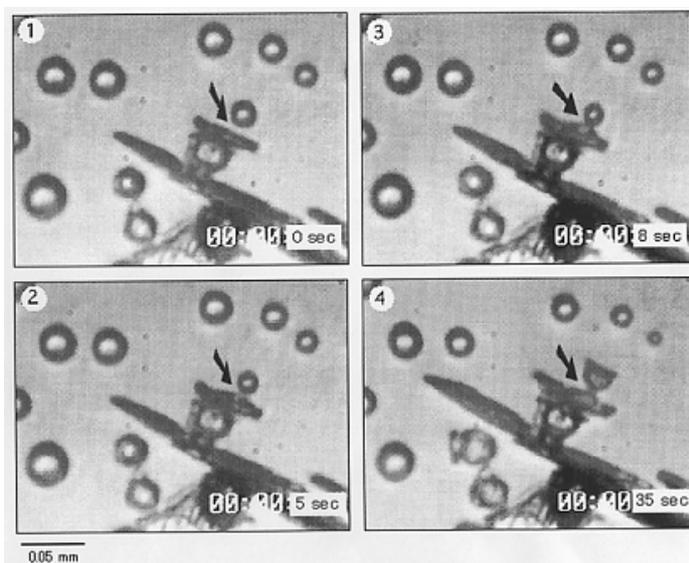


図6 氷晶表面の液膜。板状結晶の成長を側面から観察したもので、水滴を捕捉するように液膜の盛り上がりが見られる(図の矢印)。図の③から液膜の二次元的な厚さとして1~2 μmが得られた。各図右下の数字は経過時間(秒)、実験温度は-15℃。

### 【参考・引用文献】

- 1) 油川英明,1992: 雪結晶の「裏」と「表」について, *雪氷*, **54**, 123-130
- 2) 中谷宇吉郎,1949: 雪の研究, 岩波書店, 東京, 161pp.
- 3) 小林禎作, 1983: 冬のエフェメラル, 北海道大学出版会, 札幌, 39pp.
- 4) Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931: *Snow Crystals*, McGraw-Hill Book Co., New York, 226pp.
- 5) 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
- 6) Kuroda, T. and R. Lacmann, 1982: Growth kinetic of ice from vapour phase and growth forms, *J. Crystal Growth*, **56**, 189-205