

六花型霜の生成について

On the growth of hoar frost with six branches

津田将史（札幌第一高等学校），油川英明（NPO 法人 雪氷ネットワーク）

Masashi Tsuda, Hideaki Aburakawa

1. はじめに

霜は寒冷な時節に大気や地中あるいは動植物の水分が地上の物体表面に凍結して生成する氷の結晶である。また、霜は水分の付着素材や凝結・凍結条件により多様な形態に成長し、特に家屋などの窓ガラスに成長する窓霜は極めて変化に富んでいる。

本報告は、厳冬期の早朝、札幌市の郊外で自動車の窓霜のなかに見出された六花型の霜について、その形態や生成条件などを述べるものである。六花型霜は樹枝状六花の雪結晶に類似した特徴的な霜で、観察例も少なく、窓霜の実験¹⁾などにおいてもその事例は余り多く示されていない。

2. 六花型霜の観察と気象条件

図1は今回観察された六花型霜の一例である。この図の上と下の写真はいずれも野外駐車場の自動車の窓ガラス外側に成長したもので、上方の写真にはほぼ六花状の霜やその枝の幾つかが確認できる。

また、これらの六花型霜の周囲には十字型やラセン型、あるいはアラベスク文様型の霜²⁾などが混成している。図1の下方の写真は同じ窓ガラスの他の箇所で、やや斜め方向から撮影したものである。この写真に見られるように、中央部の六花型霜は窓ガラスの上方へ空間的に成長しており、さらに、他の六花型霜の枝も同様に白く輝いて空間的に伸びている。

他方、図1において六花型霜の周囲に見られるアラベスク文様などの霜は余り白く輝いていないが、それは、これらの霜が窓ガラスの表面に張り着くように成長していて、空間的には浮き上がっていないためであると見られる。

ところで、図1に示したような六花型霜が観察されたのは札幌市郊外の清田区の地域で、時期は2017年1月21日と22日の早朝であった。このような霜の成長は特別な気象条件によるものとみなされることから、

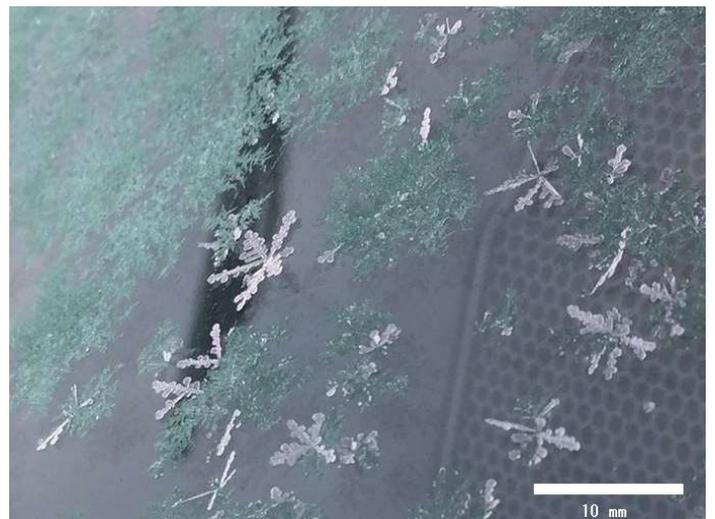


図1 自動車の窓ガラス面（外側）に成長した六花型霜。上の写真は真上から、下はやや斜めから撮影。

この時の札幌（管区气象台）における気象の状況を見てみた。

図2に1月21日の気象図表を示す。22日もほぼ同様の状況であった。この図で、赤い縦線は図1の霜を撮影した時の時刻を示しており、22日も同じような時刻に観察・撮影が行われた。

図2において特徴的なことは、湿度が80%ほどと比較的大きな値を示し、風速は1m/s程度と弱く、気温は-8℃以下の低温で、さらに、これらの値には余り大きな変動が見られないことである。また、この時は晴れて降雪もなく、放射冷却が進行する天候であった。なお、このような時の札幌市郊外の気温はヒートアイランド現象により都心部（气象台）の値よりも4~6℃低くなるようで²⁾、実際、霜の観察・撮影が行われた時の現地の気温は-14℃ほどであった。

以上のようなことから、气象台の資料をもとに、今回のような六花型霜が生成する気象条件をまとめてみると図3のように示される。この図で三つの円が重なっている黄色の部分に六花型霜の生成条件を満たしていると思われる領域である。

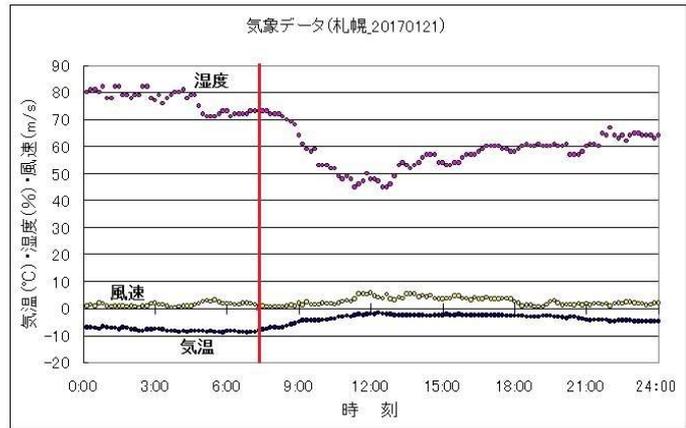


図2 六花型霜が観察された時の気象の状況（湿度，風速，気温）。赤の縦線は霜の写真の撮影時刻を示す。

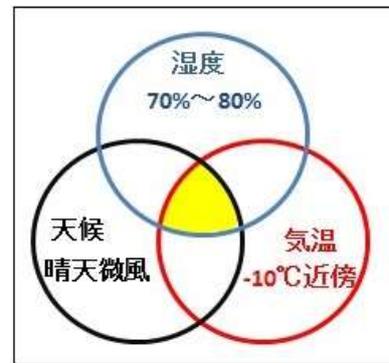


図3 六花型霜生成の気象条件

3. 霜の分類と生成について

今回観察された六花型霜の結晶は霜として特徴的なものであるが、それが霜のどのような領域に属するのか、また、その生成機構を探るために霜の分類を試みた。図4は Nakaya *et. al*¹⁾などを基にして作成した霜の一般分類図表（試案）である。この図に示したように、霜はその形態によって三種類に分類され、それらは、氷結晶が膜状に形成した氷膜霜、微水滴が粒状に凍結した氷粒霜、そしてラセン・アラベスク文様状や樹枝状などの結晶霜である。図4は、これら三種についての窓霜及び野外霜の例を加えて表示している。

ところで、この分類においてひとつの疑問が生じる。それは、これまで通説とされ

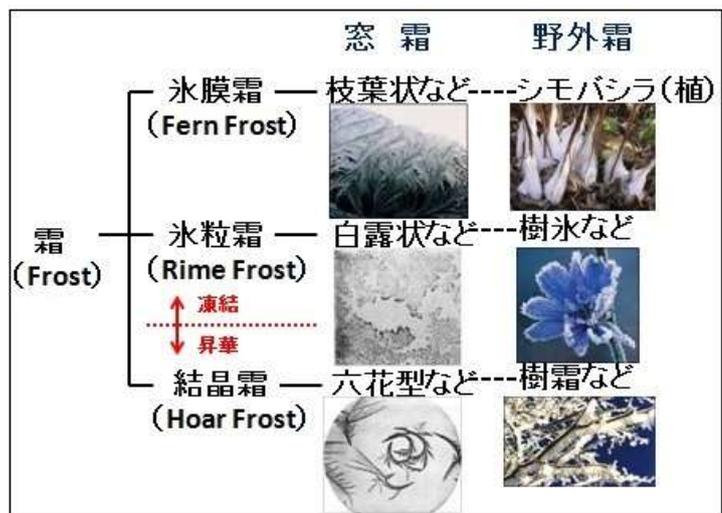


図4 霜の一般分類（試案）

てきていることであるが³⁾、図4の赤線で示したように氷膜霜と氷粒霜に属する形態のものは液相が「凍結」することによって形成され、他方で結晶霜、例えば樹霜などは空中の水蒸気が「昇華」することによって形成されるという不連続性である。ここで、樹枝状などの結晶霜が昇華によって成長するということを受け入れるならば、その霜は過飽和水蒸気量を含んだ大気環境に長い間さらされていたこと⁴⁾を認めなければならぬ。しかし、そのような過飽和の大気環境が自然界に存在するものでないことは自明であるから、この矛盾については通説の側から何らかの言及が必要となる。

さらに、通説では解釈できない例として氷粒霜と結晶霜との混在が見られることである。それを図5に示す。これは今回の観察の一部で、水滴の凍結した氷粒霜と樹枝状などの枝を有した結晶霜が混在している様子を見ることができる。従来の説によりこの混在した状態を理解するには、同じ大気環境において水蒸気の凝結・凍結と昇華の現象が一つの箇所ですべて同時に起こることを認めなければならず、天然との矛盾が深まることになる。さらに、中谷⁴⁾による疑似樹枝状の人工霜や黒岩⁵⁾による氷粒霜と結晶霜の中間的な結晶の観察などの事例に対して、従来の説では一層理解が困難なことになる。

霜の生成について従来の説が矛盾を抱えている根源は、水蒸気の凝結による微水滴が氷粒としてしか凍結しないという先験的な結論にあるのではないかと考えられる。しかし、実際には図6に示したように、過冷却微水滴は、水蒸気が水滴へと凝結する際によって氷晶状に凍結・結晶化するものが存在するわけである⁶⁾。



図5 氷粒霜と結晶霜の混在

つまり、過冷却微水滴は、仮に表現するならば相応の「質」（今の場合、過冷却の深度と表現して）というものを有し、過冷却温度だけで一義的に決まるのではなく、水滴が形成される際の水蒸気の凝結温度及び凝結速度によりその質が決定されるということである。

以上のようなことから、霜という結晶は全体として液相の水から生成し、過冷却の液膜からは氷膜霜が、過冷却度の浅い質の微水滴からは氷粒霜が、そして、過冷却度の深い質の微水滴からは結晶霜が生成するということであり、これにより従来の説の矛盾も解消され得る。

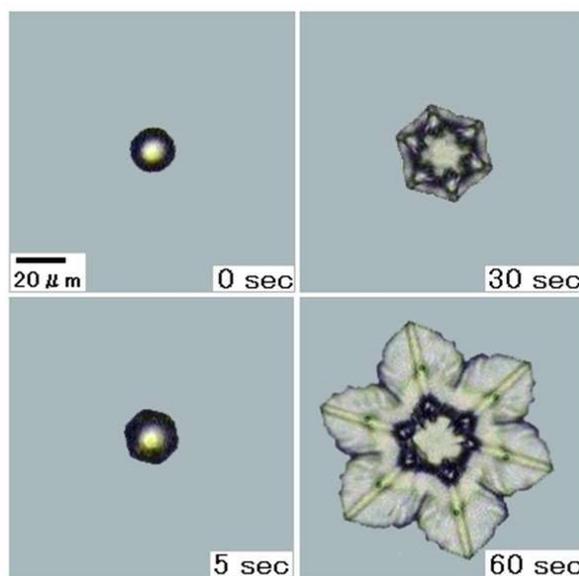


図6 過冷却微水滴の凍結実験

図7は上記のことについて Kuroda and Lacmann⁷⁾の理論を基に図表として示したものである。なお、この図の「過冷却微

水滴から結晶へ」という部分は、著者らの実験によるもので、詳細は今後の研究課題とすべきことでもある。

また、図 8 は各種の霜の生成過程について、これまで述べてきたことをまとめて示したものである。このように、霜の一般は水蒸気から液相の水の状態を経て、その過冷却の質（深度）に応じて各々の形態が形成されることになると考えられる。

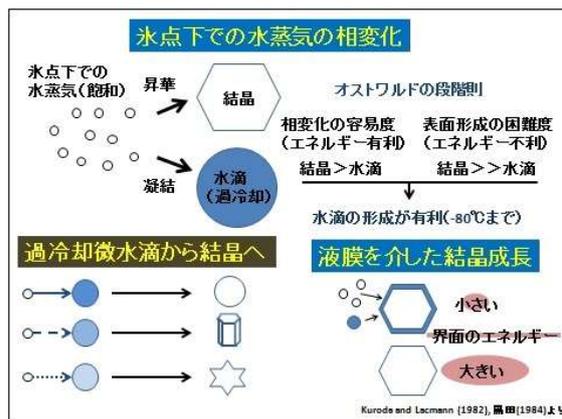


図 7 霜などの氷結晶の生成機構

4. おわりに

従来、六花型霜や樹霜などの霜の結晶は水蒸気の昇華により生成するものと言われてきたが、その通説は天然の現象と矛盾を抱えるものであった。これに対して本報告は、霜の昇華成長が必ずしも実証されているわけではないので、昇華ということをやア・プリアリに受け入れるのではなく、自然界の現象に沿って霜の生成機構を考察してきた。その結果、霜は全体として液相の水を介して生成・成長するものと見なされる。特に、六花型霜は、先ず初期結晶として相応の条件を有した過冷却微水滴が氷晶化し、表面はエネルギー的に平衡な厚さの液膜で覆われる。そして、その液膜は大気中の過冷却微水滴や水蒸気が水分として補給され、厚みを増して不安定化することから、それが平衡の厚みへと減少するように固相の霜の結晶が成長するというのである。

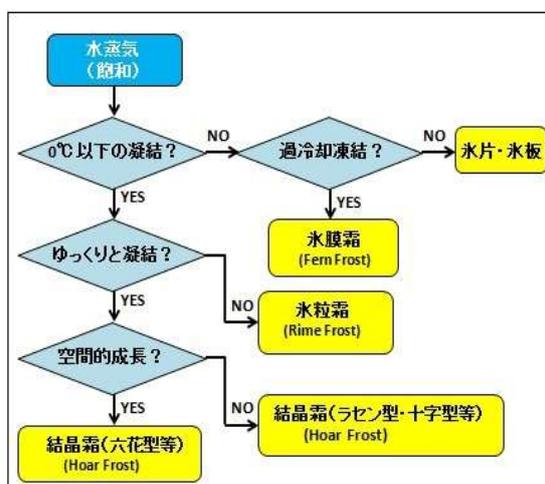


図 8 各種の霜の生成過程

【参考・引用文献】

- 1) Nakaya, U., M. Hanajima and K.Dezuno, 1939: Experimental Researches on Window Hoar Crystals, a General Survey, *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Imp. Univ., Ser. II*, Vol.III, No.1, 1-13.
- 2) 石川信敬・油川英明・成瀬廉二, 1978: 札幌市における放射冷却日の最低気温分布, 低温科学, 物理篇, **36**, 121-137.
- 3) 日本雪氷学会(編), 2014: 新版 雪氷辞典, 東京, 古今書院, pp.307.
- 4) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 東京, 岩波書店, pp.161.
- 5) 黒岩大助, 1954: 過冷却した霧のなかでの樹霜の成長, 低温科学, 物理篇, **13**, 105-110.
- 6) 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
- 7) Kuroda, T. and R. Lacmann, 1982: Growth kinetic of ice from vapour phase and growth forms, *J. Crystal Growth*, **56**, 189-205.