

雪の結晶の非対称的な形態について

On asymmetric forms of snow crystals

油川英明¹

Hideaki Aburakawa

Corresponding author: abu440407@yahoo.ne.jp

雪の結晶は、樹枝状などの板状結晶について、一般に対称性の整ったものとして知られているが、実際にはほとんどが非対称的である。中谷²⁾は、非対称的な雪の結晶の成長は水蒸気の供給が結晶の成長面に対して不均一になされるためであるとし、今日においてもそれが通説となっている。しかし、天然の雪雲内において、雪の結晶のスケールで水蒸気の分布が不均一であるということや、その状態が結晶の一定の成長まで継続するということは極めて想定し難いことから、ここでは、従来の中谷²⁾の気相（昇華）成長説ではなく、雲粒による液相成長説を基に、雪の結晶の非対称的な形態の形成について考察を行った。

1. はじめに

中谷²⁾は、雪の結晶を人工的に作製するに際して霜の結晶の成長を観察し、それに倣うことにより実験を遂行した。この過程はいわゆる三段論法的なものともみなされ、1) 雪の結晶＝霜の結晶、2) 霜の結晶＝水蒸気による気相（昇華）成長、よって、3) 雪の結晶＝水蒸気による気相（昇華）成長、というもので、この論理による仮説をもとに実験を行った。そして、その結果から上記の仮説は実証されたとして「中谷ダイヤグラム」²⁾が作成され、今日においても雪の結晶生成の通説となっている。

しかし、中谷のこの気相成長説には幾つかの問題点が見いだされる。その一つとして、雪の結晶が水蒸気から気相成長するとしたとき、「中谷ダイヤグラム」の縦軸に示されるような水蒸気の「過飽和」が要求されることである。しかし、天然には「過飽和」なる現象はほとんど見られない。ましてや降雪を伴う雪雲のなかは無数の雲粒や氷晶が激しい気流により攪拌されている状態にあり、ここに水蒸気の「過飽和」を求めることは極めて困難なことである。そして、雪の結晶の非対称的な成長については、過飽和による気相成長説ではさらに理解が難しいことになる。

上述のように、雪の結晶の生成について、実験では過飽和が必要とされるが、それは天然には存在しない。これは明らかに「矛盾」である。この場合、両者を単に妥協させるとか、一方を他方に対して優先させるとか等々では矛盾は解消され

ない。その解消には矛盾に関わる先人の教えに習い、現象観察の最初に立ち返り、既存の原理や法則に拘泥することなく自由に視野・思索を広げ、新たに論理を組み直すことであると考えられる。

中谷²⁾の人工雪の実験では、樹枝状などの典型的な結晶の成長は水飽和以上の過飽和の水蒸気によるとされているが、前述のように、雪雲にはそのような条件は存在しない。つまり、天然の雪の結晶は、雪雲内において飽和乃至は飽和に近い水蒸気のなかに浮遊する過冷却微水滴の雲粒から生成されるものと推断されるわけである。

著者は、このことを仮説として実験を行い、過冷却微水滴、つまり雲粒から雪の結晶の生成を得ることができた³⁾。これを基に、雪の結晶の非対称的な成長について考察した結果を報告する。

2. 非対称的な雪の結晶の観察

非対称的な雪の結晶は、平地や内陸の山地など、地域に特定されず一般的に観察されるが、平地の方が比較的多く見られるようである。その理由については後に述べる。

非対称的な結晶の観察例を図1に示す。これは2021年の冬季に札幌において観察・撮影されたもので、最大の径は2.5mmほどである。この結晶は中谷の一般分類²⁾では畸形に属するものであるが、結晶の各々の枝は、長短の違いはあるものの、普通樹枝に分類されるものである。つまり、中谷ダイヤグラムによれば、これは樹枝状結晶の領域において成長したことになる。そして、雪の

¹NPO 法人 雪氷ネットワーク

NPO Network of Snow and Ice Specialists

結晶成長に関する中谷の気相（昇華）成長説に基づくならば、図1の結晶は、各枝への水蒸気の供給が不均等な状態で成長したことになる。特に、この図の①と③の二つの枝に挟まれた②の枝の成長は極端に遅れていて、水蒸気の供給が結晶の枝に対してこのように特異なものであると考えることは極めて不自然であると言える。

さらに、中谷の人工雪の実験によれば、図1の樹枝状結晶が①の枝のような長さに成長するためには少なくとも30～60分程度の時間を要することから、この結晶の成長に際して、水蒸気の供給が上記のような不均等さで、その時間、一定に継続されなければならないことになる。このような現象が天然の雪雲のなかで一般的に起こっているとみなすことは、想像の域を越えて余りにも非合理的なことであると考えられる。

これまで、雪の結晶の対称性に関して、角板や樹枝状結晶などの板状結晶について調査を行ったところでは、完全な対称性を有する結晶は得られなかった⁴⁾。この調査の限りでは、雪の結晶は、雲粒の粒径が比較的小さな雪雲から得られる結晶は対称性が良く、また、粒径が大きい雪雲からの結晶は対称性が劣る傾向にあった。なお、雲粒の粒径が小さな雪雲はその粒径分布の分散が小さく、粒径の大きな雲粒の雪雲では、その粒径分布の分散は比較的大きくなっている。

前者の雪雲は雲粒の形成が穏やかな場合で、後者は海面等からの水蒸気の蒸発が活発な場合と見なされる。つまり、一般に観察される雪の結晶は、雪雲の雲粒によりその対称性の優劣が決められることから、先に述べたように、水蒸気の凝結が活発な海浜近傍の平地の方が、雪雲が穏やかに形成される内陸の山地よりも非対称的な雪の結晶が多く見られることになるとみなされる。

3. 実験による非対称的な雪の結晶の生成

図2は、過冷却微水滴を雲粒に見立てて行った氷晶の成長実験³⁾の結果で、撮影された動画の始めと終りの画像（図のAとB）を示している。

この図から、雪の結晶の成長が粒径30 μm ほどの雲粒の凍結・結晶化から始まっていて、結晶の各枝の成長は周囲の雲粒を捕捉することにより行われ、また、各枝の側枝は雲粒を捕捉して伸びている。そして、側枝の形は雲粒の大きさ及び雲粒の特性（形成時の水蒸気の凝結速さ）により、図のBのように非対称的な結晶が形成されてい

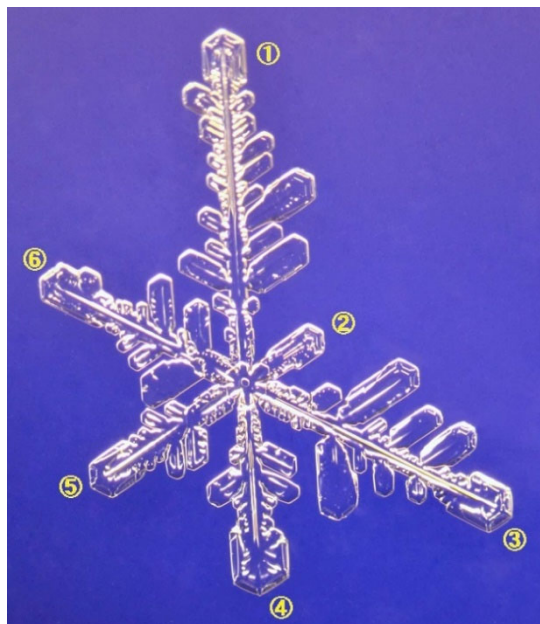


図1 非対称的な雪の結晶の一例。

（撮影：札幌 2021/02/27）

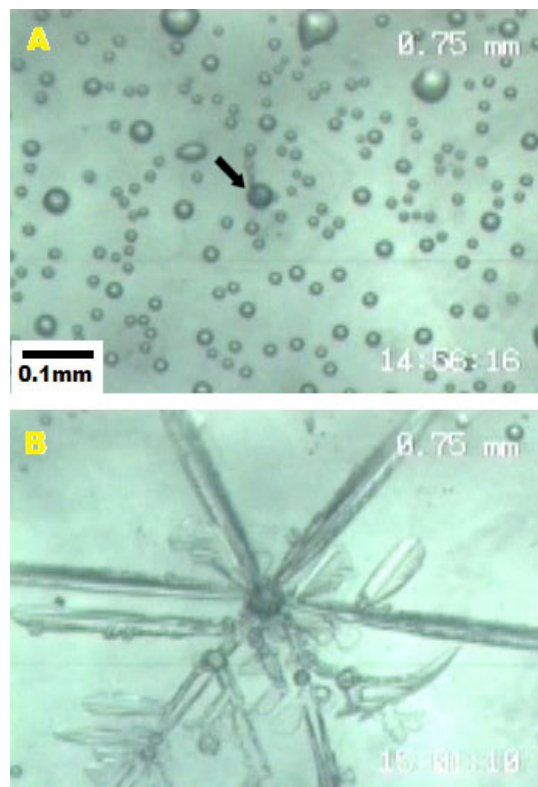


図2 過冷却微水滴（雲粒）から非対称性の雪の結晶が生成. Aの矢印を付した微水滴から結晶化が開始. BはAから4分54秒後. 実験温度は -15°C .

る。つまり、図のAとBを比較して、Aの上方の雲粒は完全な結晶化を示し、下方の雲粒は氷球

状の形態を留めて結晶化している。このように、過冷却微水滴は、その温度が同じであっても、凝結の過程で獲得した特性により、凍結形態が氷球、氷球状の結晶化、単独の結晶化、母結晶への同化（結晶化）と、種々の形態を示すことになる。この場合、余談ではあるが、図2のように一般的な潜熱放出の形跡が見られないのは興味深い。このようなことから、天然の雲粒は粒径及びその特性がそれぞれ異なるので、これらによって成長する天然の雪の結晶は、前述のように、ほとんどが非対称な形態に成長するものと見なされる。

さらに、天然の種々の結晶は、中谷の分類によるところの霰、雲粒付結晶、無定形、畸形そして正規六花型結晶などは、雲粒の一連の凍結・結晶化によるものである。そして、従来、中谷により、雪の結晶の類だけが水蒸気から昇華成長したものとされてきたが、上述のように、天然の降水現象としての雨、雹、霰、雪片、雪の結晶等は、全て雲粒の形態的な変化として理解できる。

ところで、図2のように雪の結晶を生成する過冷却微水滴は、天然の雲粒が形成される過程のように、氷点下で水蒸気からゆっくりと凝結して形成されたものであり（30分で $20\mu\text{m}$ ほどの径）、微水滴を単に過冷却させたものは氷球状にしか凍結せず、両者は異なる凍結形態を示す。

4. 中谷の人工雪の非対称性について

雪の結晶の非対称的な実験例として、中谷の人工雪を図3に示す。これらの結晶は、写真撮影のために兎毛を水平に張って固定し、その上に生成されたものである。いずれの結晶も下向きに伸び出た枝が上向きの枝に比して長く成長している、これについて中谷は、「水蒸気の供給が下方からなされるためである」として、このような結晶の成長は、上方と下方の枝が不均等な水蒸気の供給によるためであると結論している。このことが、先の図1に示したような天然の非対称的な雪の結晶の成因とされ、通説となっている。

ここで、下方の枝の成長が全て同じでないことについては言及されていない。さらに、人工雪を作製する装置の気流が完全な層流ならば、気流の向きに対する結晶の成長の影響を考慮することも一般的には必要かも知れない。しかし、この装置による上昇気流は、レイノルズ数が6000を超えると概算されることから、この気流は乱流が十分に発達した状態で、また、乱流渦の大きさも数

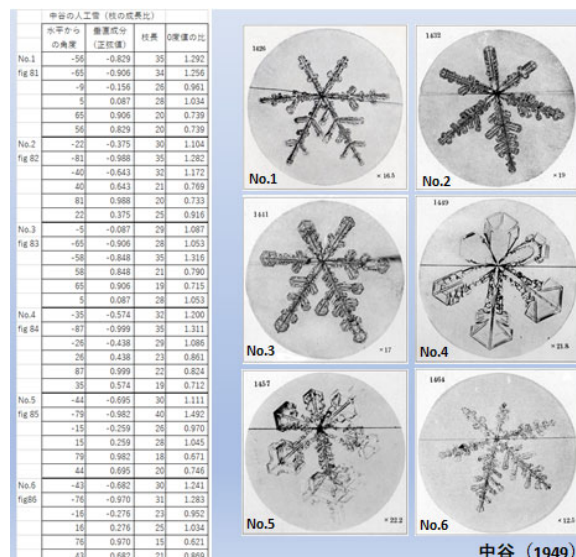


図3 中谷の人工雪（右）. 左の表は各結晶の枝の成長比と水平からの角度（正弦値）.

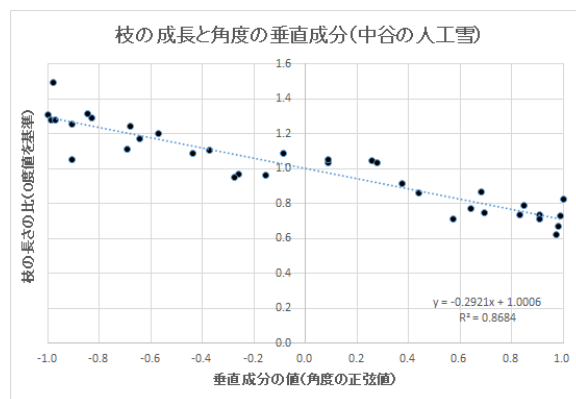


図4 中谷の人工雪における各枝の成長比とその枝の水平からの角度（正弦値）.

ミリの結晶よりはるかに大きいものと見なされ、雪の結晶に対する水蒸気の供給は全体的に均等であるとみなされるわけである。

それ故、図3の非対称的な結晶について、図2に示したように、また、Kuroda & Lacmann⁵⁾の理論により、雪の結晶の液相成長説に基づいて以下に考察を行うこととする。

雪の結晶の成長は、結晶を覆う液膜の厚さによって進行するものとすれば、図3のように結晶の姿勢が固定され、そして、その成長に1時間前後の長い時間を必要とすることから、結晶表面を覆う液膜は重力の作用により下方へ徐々に流下する傾向が考えられる。そのように推察すれば、下方に向かっている結晶の枝の液膜は、上方からの流れにより厚さを増して、成長が上方の枝よりも大きくなる。この成長の度合いは、下方に向いた枝であれば鉛直方向に近いほど液膜が厚くなり、

その成長が大きく、また、上方に向いた枝は、鉛直方向に近いほど液膜が薄く、その成長が小さくなることが推察される。このことを確かめるために図3の左に示したような表の作成を試みた。

図3の左の表は、右の結晶の各枝について、水平線（兎毛の線）からの角度を測り、上方は+、下方は-の値として、その正弦値（垂直成分）を示し、また、成長した枝の長さは、各々の結晶の水平方向の成長を基準にして、各々の長さの比を示している。そして、これをグラフに示したものが図4である。この図から、枝の角度と成長には高い相関が見られることから、図3の人工雪の非対称的な成長は、前述のように、液膜が関与しているものとみなされる。ところで、小林⁹⁾による拡散型の人工雪作製装置は、水蒸気が上方から供給される仕組みになっているが、成長した結晶のなかで下方へ向かう枝の大きなものも見られ、上に述べた考察に示唆を与えるものと考えられる。

図5は、上述の内容の概念図（図の左上）を示したもので、下方の枝ほど液膜を厚く描いている。また、中谷⁹⁾は、人工雪の装置内には1~2μmの径の過冷却微水滴が浮遊していることを示し（図の左下）、雪の結晶がこれにより成長していると述べている。しかし、天然にはこのような微細な雲粒の雪雲は見られないことから、中谷は今後の研究課題であるとしてその著書⁹⁾を閉じている。

図5の右は中谷ダイヤグラムと、その縦軸に目盛られた Nakaya²⁾による過飽和度（氷飽和に対して）の定義である。湿度とは一般には気相の水蒸気に関することであるが、ここでは微水滴の液相をも水蒸気として扱い、湿度の値を求めている。その妥当性は別にして、これらのことから、中谷は、雪の結晶の成長について明らかに過冷却微水滴つまり雲粒の関与を考慮していたわけであるが、人工雪作製の出発点が水蒸気による気相（昇華）成長説であり、実験の成功によってこの説が確定化されることになったものと考えられる。そして、その帰結として、図5に示されたような、余り一般的ではない過飽和度（湿度）を新たに定義せざるを得なかったものと推察される。

5. おわりに

非対称な雪の結晶は、通説となっている中谷の気相成長説ではなく、雲粒による液相成長説によって生成するとした方が妥当のようである。

中谷の気相成長説は、三段論法的な仮説が人工

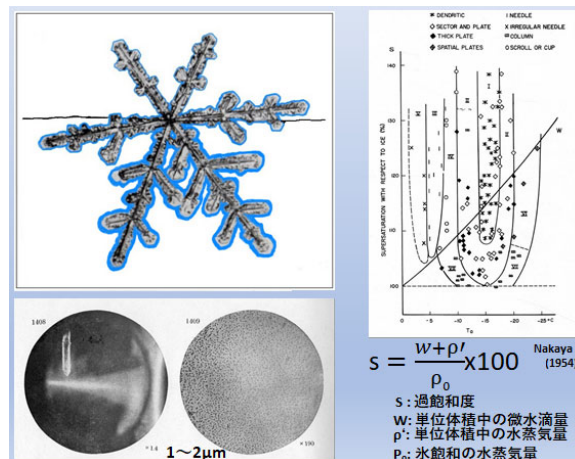


図5 非対称的な人工雪の成長概念図（左上）と人工雪装置内の微水滴の浮遊状態とその採集結果（左下）。右図は中谷ダイヤグラムと中谷による過飽和度の定義。

雪の作製実験により実証されたとして導かれたものであるが、この論法は、各段の命題が徹底して検証を必要とするもので、これが不徹底である場合には第三段目の結論が覆ることになる。すなわち、中谷は、「雪の結晶」＝「霜の結晶」としたが、両者は部分的な類似性は見られるものの、完全な同定には至っていない。また、「霜の結晶」＝「気相（昇華）成長」ということについては、本論でも触れたように、また、Nakaya²⁾も実験的に示したが、氷結晶の表面には疑似液体膜が存在し、この液膜を介して結晶が液相成長するものであることが、理論的、実験的に示されてきている。これらの結果から、第三段目の「雪の結晶」＝「気相（昇華）成長」の結論は成立しないことになる。

【参考文献】

- 1) 中谷宇吉郎, 1949: 雪の研究, 岩波書店, pp.161
- 2) Nakaya, U., 1954: Snow Crystals, Harvard Univ., pp.510
- 3) 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
- 4) 油川英明・尾関俊浩・丸藤貴弘, 2003: 雪結晶の対称性について, 北海道教育大学紀要(自然科学編), 第53巻, 第2号, 17-26
- 5) Kuroda and Lacmann, 1982: Growth kinetic of ice from vapour phase and its growth forms, *J Crystal Growth*, 56, 189-205
- 6) 小林禎作, 1957: Diffusion Cloud Chamber による雪結晶習性の研究, 低温科学, 物理篇, 16, 1-26