

畸形雪結晶の成因について

高橋 忠司*

1. はじめに

雪の結晶の形は、古くから美しいものの一つとして、様々なものの模様として使われてきた。そうした雪結晶は写真1(樹枝状結晶)や写真2(扇形結晶)に代表されるような、平板状で六方対称の形をしているものである。しかしながら、天然の雪結晶を観察すると、こうした対称性のよい美しい形ばかりとは限らないのである。中谷は、北海道で雪結晶を観察し、平板状の結晶以外にも六角柱や針のような形の結晶、さらに複数の結晶が組み合わさった立体的な形をした結晶が降ることを示し、科学的な根拠に基づいて雪の結晶の分類を世界に先駆けて行った。分類するに当たって、平板状の結晶についても、六方対称性を有しない結晶が頻繁に観察されることを示した。中谷は名著「雪」の中で次のように述べている。

“平面内に発達する結晶でも、実際は全部六次の美しい対称形即ち正規の六花となるとは限らず、それと同程度にしばしば畸形的な発達をすることがある。……中略……此処で畸形というのは規則正しい六花以外の平面結晶という意味で、結晶習性の問題からいえば、別に畸形ではなく、むしろ外形まで完全に六次の対称を示しているいわゆる正規六花状の結晶の成因の方がむしろ不思議なのである。”

中谷は畸形を便宜上比較的簡単なものについて五つに類別している。本稿ではこれら五つの

種類について、これまでに志賀高原で観察した雪結晶を示し、考察する。

2. 畸形雪結晶の分類

(1) 他の核の付着によって生じた変形

半ば成長した結晶の一点に他の核が付着すると、その点で結晶は変形する。中谷は核を特定していないが、多くの場合雲粒が付着し、凍結したものが核となっている。雲粒は過冷却しているため、雪結晶に付着すると直ちに凍結する。結晶の周縁部に付着した場合には、結晶は付着した部分でそれまでの成長を停止し、付着凍結した雲粒が中心になって成長を始める。写真3の樹枝状結晶はその例である。一本の枝だけ途中から新たな樹枝の成長が始まっている。写真4はその部分を拡大したものである。矢印の先の小さな円形は付着凍結した雲粒の痕跡である。球形状の雲粒が六角柱状の結晶を経て、板状に成長をしてゆくには時間がかかる。その間、もとの結晶の成長は停止する。このため、大きい雲粒が付着すると、成長が停止する時間が長くなり、非対称性が大きい結晶に成長してゆく。こうした成長は室内実験でも確かめられている。写真5の結晶は、高さ約16mの大型低温槽を用いて、自由落下中に雪結晶を成長させ、落下途中に微水滴と衝突・成長させて得られたものである。衝突した微水滴の大きさは約 $30\mu\text{m}$ である。一本の枝の成長が完全に止まっている。同様な実験で写真6で矢印で示すような付着凍結した雲粒から枝の成長が始まっている結晶も観察された。雲粒の付着が成長の初期に起こると、

* 埼玉大学教育学部理科教育講座

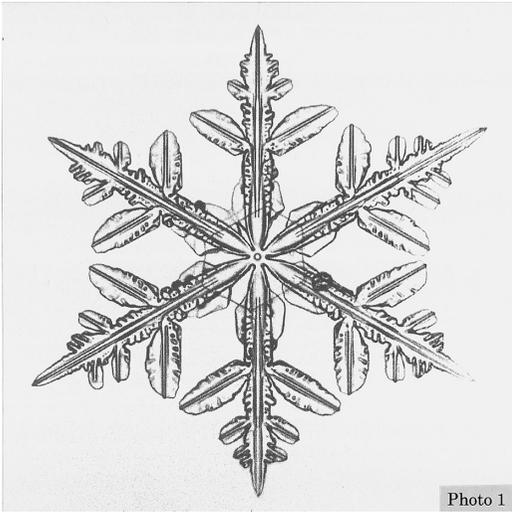


Photo 1

写真 1

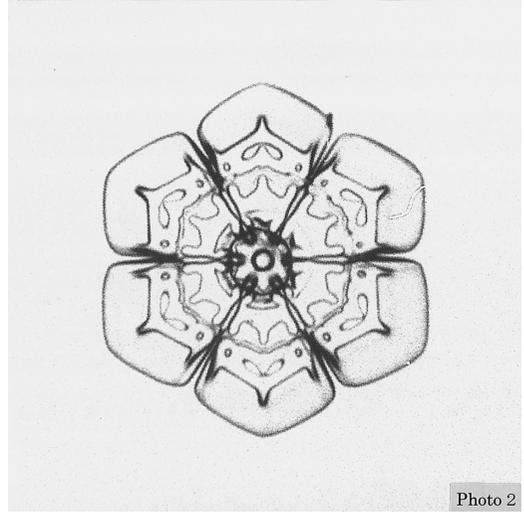


Photo 2

写真 2

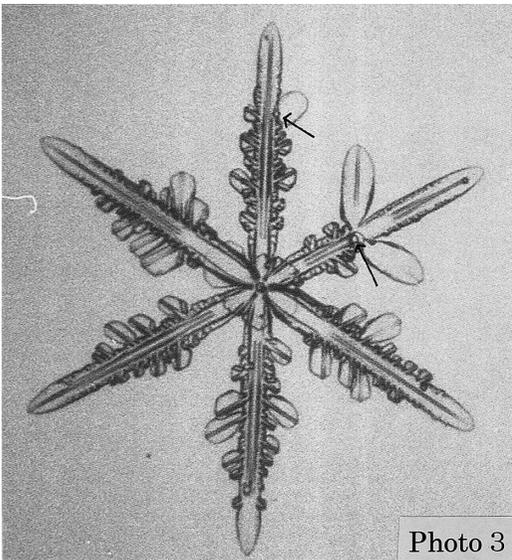


Photo 3

写真 3

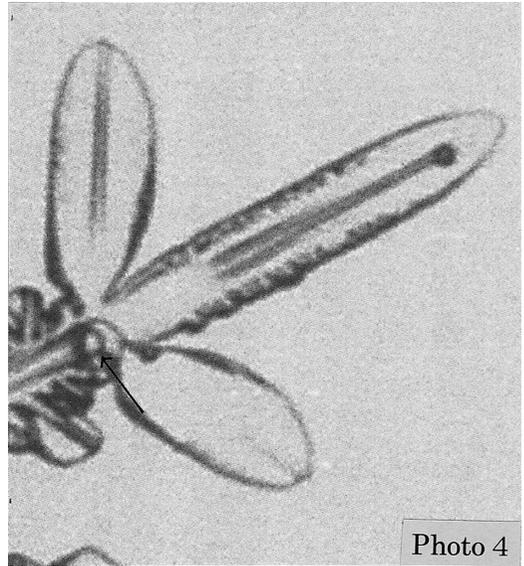


Photo 4

写真 4

結晶のその後の成長が大きく影響され、非対称性が著しくなる (写真7)。写真8の結晶は中心部の様子が良くわからないが、同じように成長初期に雲粒が付着した例と思われる。

Takahashi (1979) によれば、雲粒の付着が -13°C 以上で起こると、凍結した雲粒はもとの結晶と同じ結晶主軸を持つ単結晶になるので、

結晶はそのまま板状の成長をする。 -13°C 以下になると、付着凍結した雲粒の中で多結晶になる割合が増えてゆく。写真9は前述の実験で、樹枝状結晶に衝突後、多結晶となった雲粒から枝が成長している例である。天然雪で写真10のような立体角板が観察されるが、同じような成因によるものである。

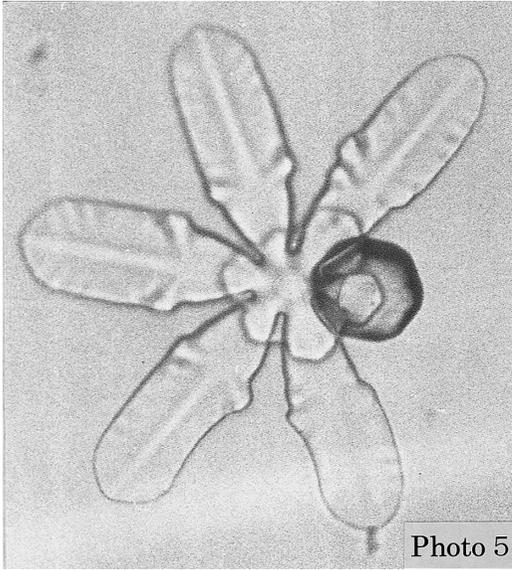


Photo 5

写真 5

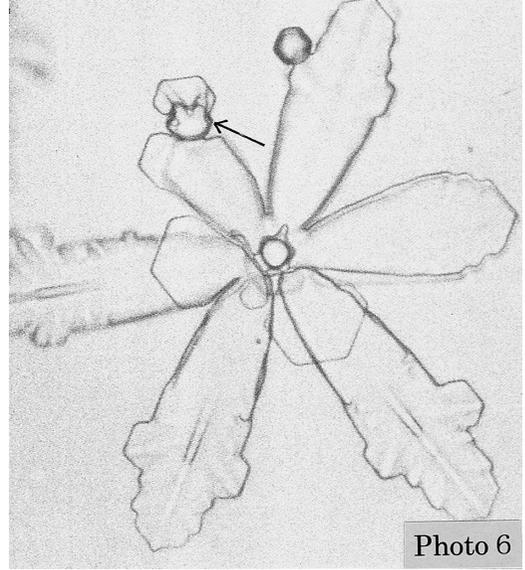


Photo 6

写真 6

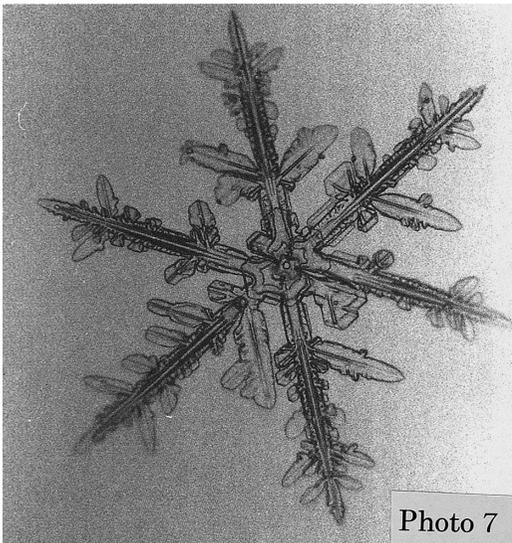


Photo 7

写真 7

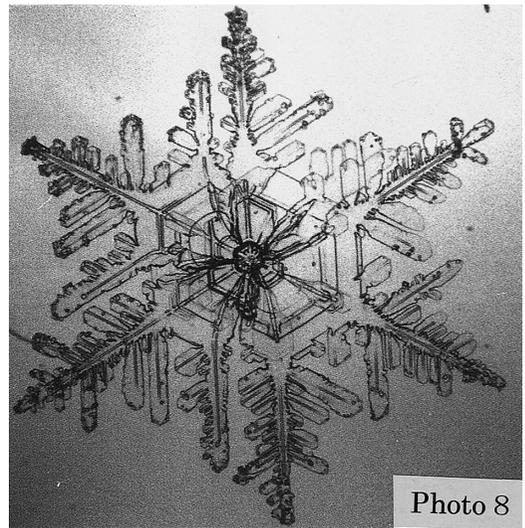


Photo 8

写真 8

(2) 枝の非対称的な発達

正規六花型の結晶の多くは、何らかの理由で枝の一部分が他の枝と異なる成長をしているものが多い。中谷が述べているように、本来平板上の結晶は大きく成長すると、らせん状に回転して落下することが多く、このため水蒸気の供

給が一様になり対照的な形に成長する。非対称的な成長の原因として、前述のような雲粒の付着によって、成長が一時的に停止することが挙げられる。さらに、多量の雲粒が付着すると、落下姿勢が固定され、下方に水蒸気が多く供給され、非対称的に成長する。写真11の結晶がそ

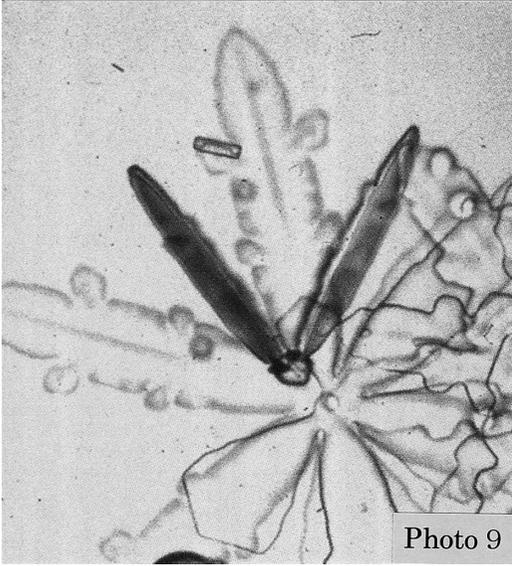


Photo 9

写真9

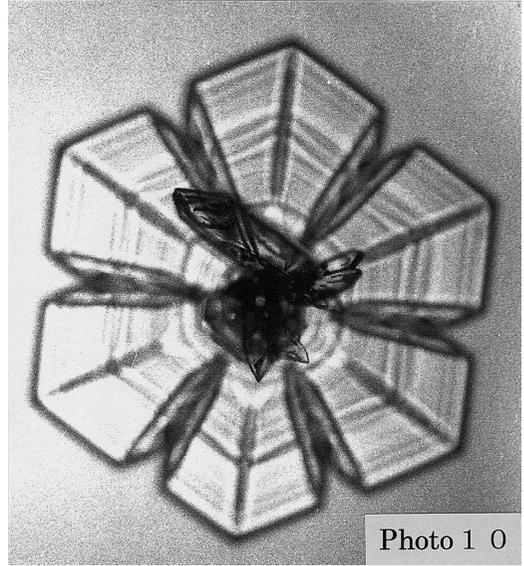


Photo 10

写真10

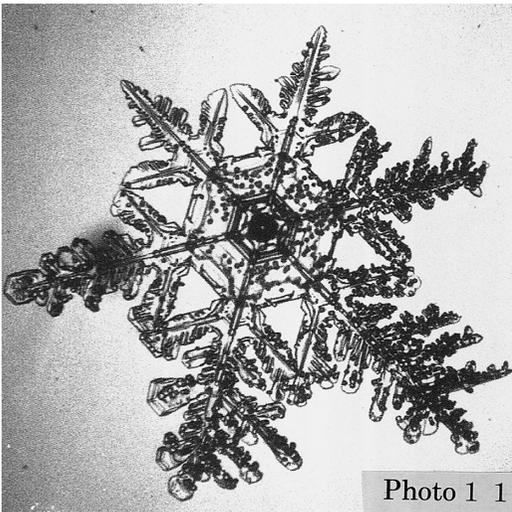


Photo 11

写真11

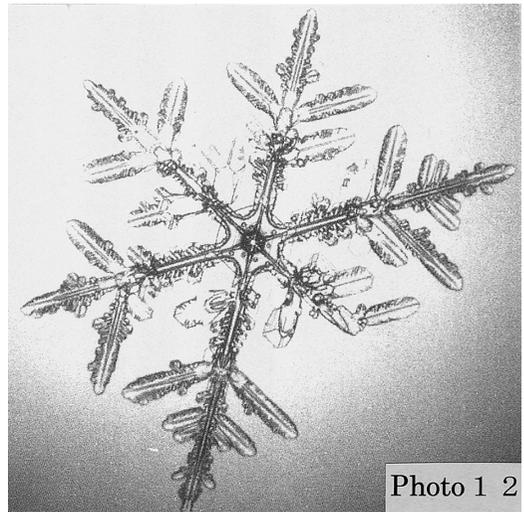


Photo 12

写真12

の例であり、黒く見えるのは雲粒が多量に付着しているからである。また、結晶は大きく成長すると、互いに衝突し、併合する。いわゆる“わたゆき”とか“ぼたゆき”といわれるのは、多数の結晶が衝突併合して出来たものであり、雪片と呼ばれる。写真13は結晶が二つから成る初期雪片であるが、くっつきあった部分はお互

いに成長しないので、雪片が分離すると非対称性が大きな結晶となる。写真12や14の結晶はその様にして出来たと推察される。写真15と16の星状結晶は今述べた原因によらぬ、非対称性が大きな結晶であるが、それぞれの枝は、三花と三花及び二花と四花に別れ、次の分類に属するものと思われる。

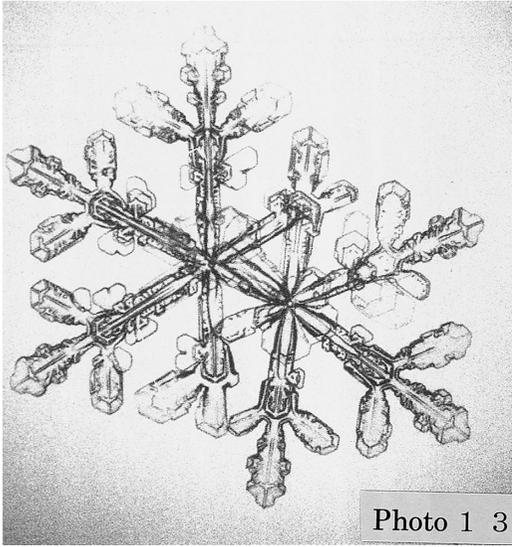


Photo 1 3

写真13

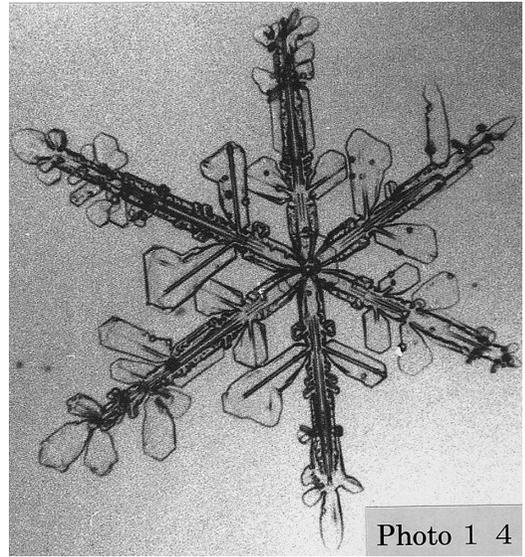


Photo 1 4

写真14

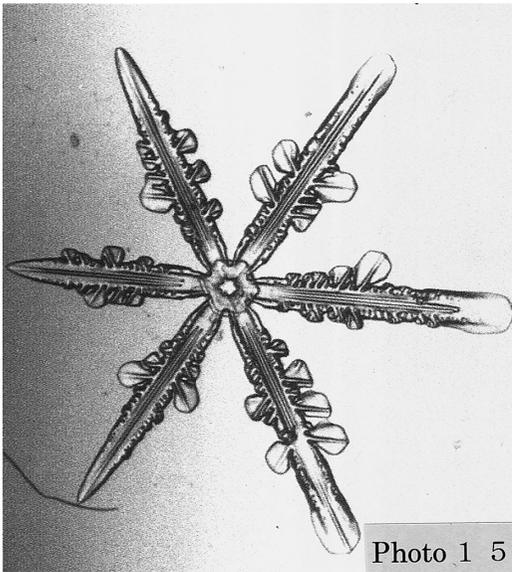


Photo 1 5

写真15

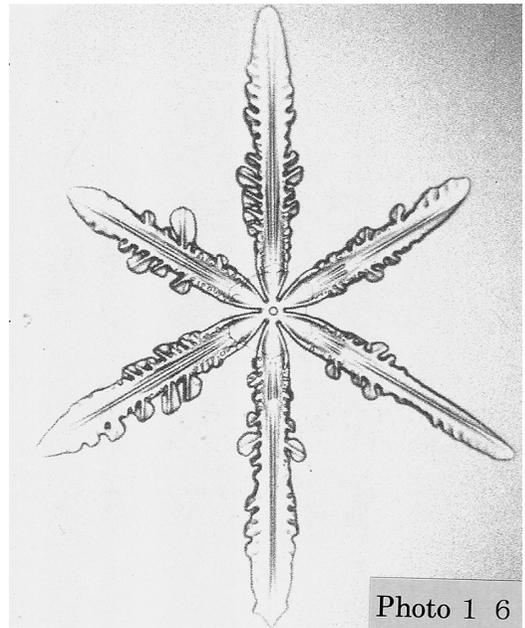


Photo 1 6

写真16

(3) 三花及び四花系統の畸形

六花型の結晶の中には、三花や四花型の結晶がしばしば観察される(写真17・18)。中谷はこれらの雪結晶は、もともと六花の結晶として

成長したものが、成長の途中もしくは地上に落下したときに中心部から二つに分離して出来たと推測した。また、中心部の本体として、初期状態の骸晶の上下の底面から結晶がのびる場合

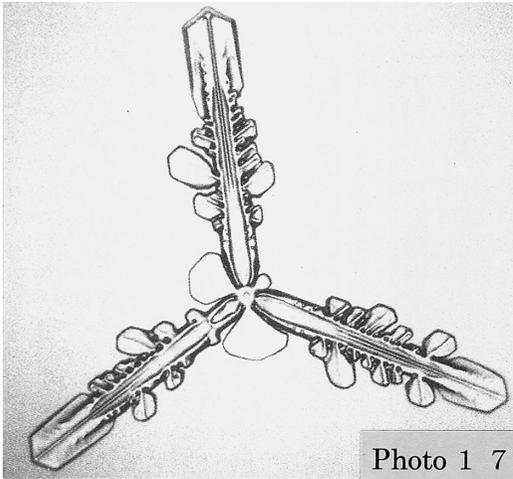


写真17

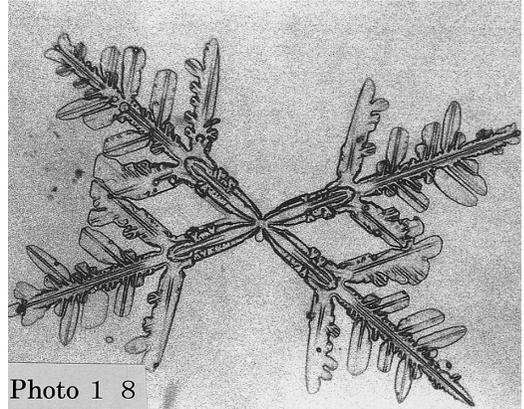


写真18

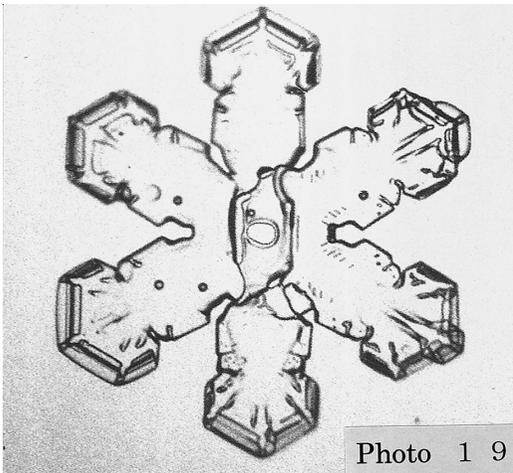


写真19

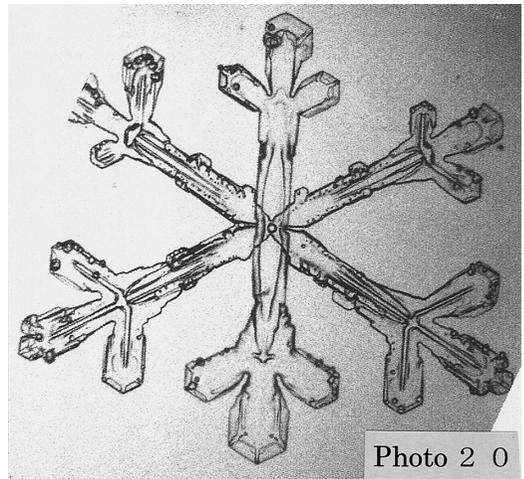


写真20

と、結晶の核が二つ重なった場合があると推論したが、核については言及していない。この種の畸形を写真19～24に示した。写真19は三花と三花、写真20は二花と四花、写真21は一花と五花、写真22は二花と四花の組み合わせである。写真23と24は四花型の畸形である。

小笠原（1997）は、結晶の実体写真撮影を行い、その観察から、板状結晶が上下二枚の板から成ること、樹枝状結晶の中には二枚の板が、一花と五花、二花と四花、二つの三花といった

ように等方的でない成長をする場合があることを示した。

一方、Takahashi and Mori（2006）は大型低温槽を用いて、凍結した微水滴の成長を調べた。図1に示すように、凍結した微水滴は球形から軸比が1：1の六角柱（またはそれに近い形）に成長した後、各温度に応じた雪結晶に成長する。微水滴が小さな場合には、上下の板は同じように成長するが、大きな微水滴では写真25に示すように非等方的に成長することがあること

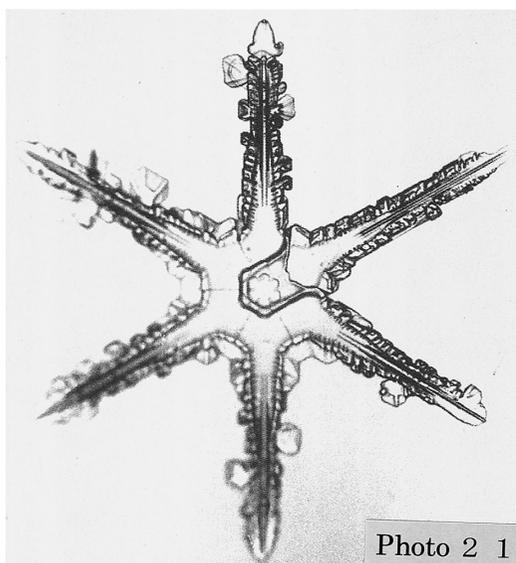


Photo 2 1

写真21

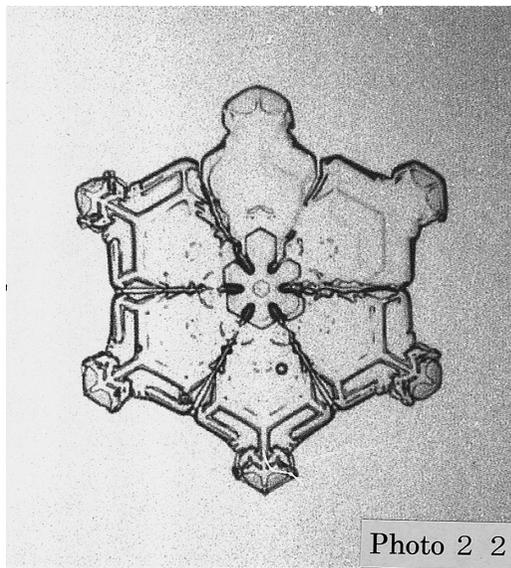


Photo 2 2

写真22

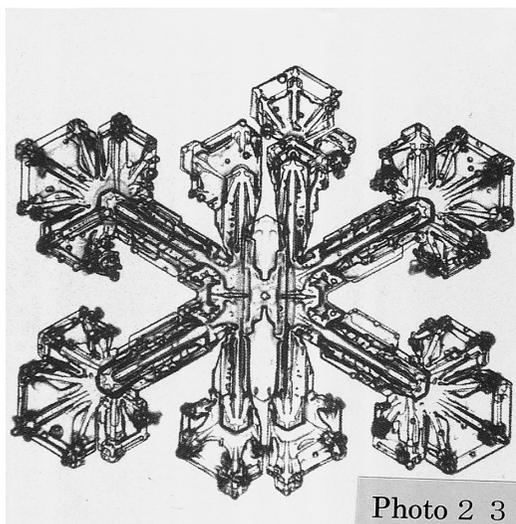


Photo 2 3

写真23

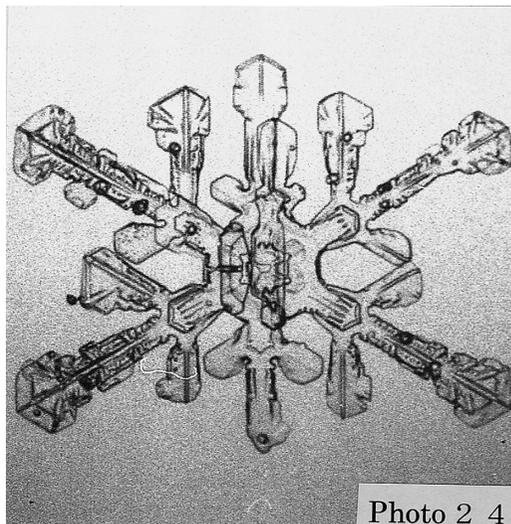


Photo 2 4

写真24

を示した。また、Takahashi (1975) は微水滴が単結晶に凍結する場合、中央部に結晶主軸に垂直な面に割れ目が入りやすいことを示した。写真26は自由落下中に凍結した過冷却水滴に見られる変形を示したものであるが、水滴中央部に矢印で示すように割れ目が入っている。過冷

却水滴が凍結する場合、表面から凍結が進行するため、氷の体膨張による圧力が球状の水滴の中央部にたまり、強度が弱い結晶主軸に垂直な面に割れ目が入ることによると推測した。雲粒のような小水滴でも凍結のときに同様な現象が起こると考えられるので、結晶の核となった場合

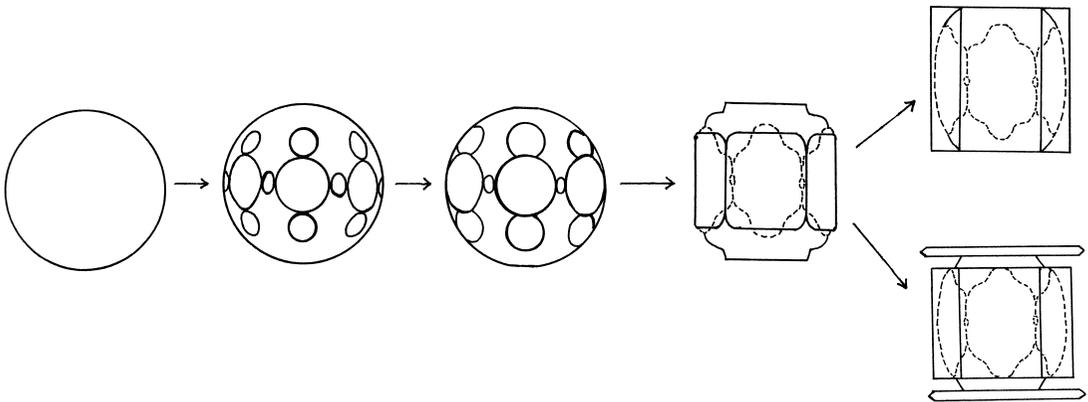


Diagram of the growth of frozen water droplets

図1 凍結水滴の成長のモデル図。Takahashi and Mori (2006) より

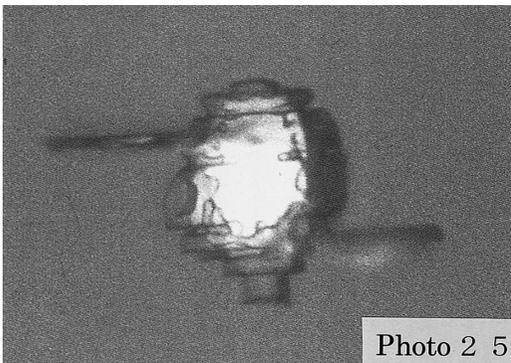


Photo 2 5

写真25

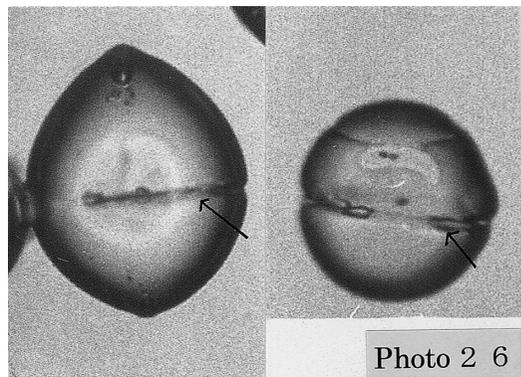


Photo 2 6

写真26

に、中央部から分離しやすいと思われる。

(4) 畸形角板

中谷は畸形角板の典型的な例として、一辺からV字形の切れ込みがはいる場合を挙げている。このタイプの結晶は志賀高原ではあまり観察されなかった。その原因としては、志賀高原では水蒸気量の多い雲からの降雪が多いため、六花や樹枝状に成長した結晶が降ることが多く、大きく成長した角板を観察する機会が少ないことが考えられる。そんな中で、この分類に属する例を写真27・28に示した。切れ込みが入る原因についてはよくわからないが、水蒸気の供給が

非等方的になり、写真29に示すように一辺だけ角板から扇形への成長が起こったとも考えられる。部分的に成長が阻害されたとするならば、雲粒やなんらかのエアロゾル粒子が付着したと考えられるが、推測の域を出ない。

(5) 雑

上に述べた分類では説明がつかない結晶が、沢山観察される。そんな例を写真30～32に示した。このような結晶の成因を調べるには、小笠原が試みたように、実体写真から結晶の立体構造を観察することが有効な手段となるであろう。

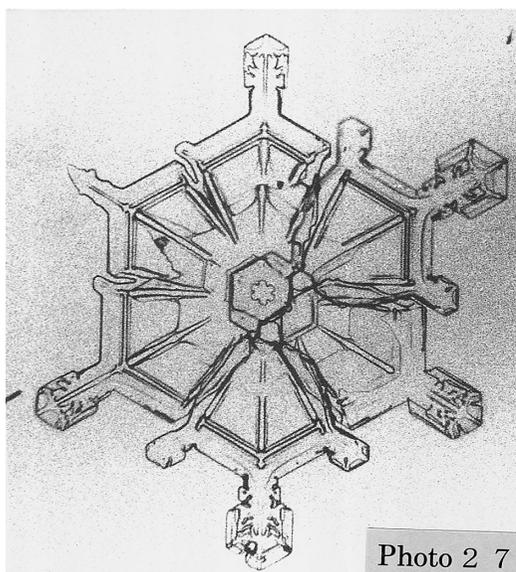


写真27

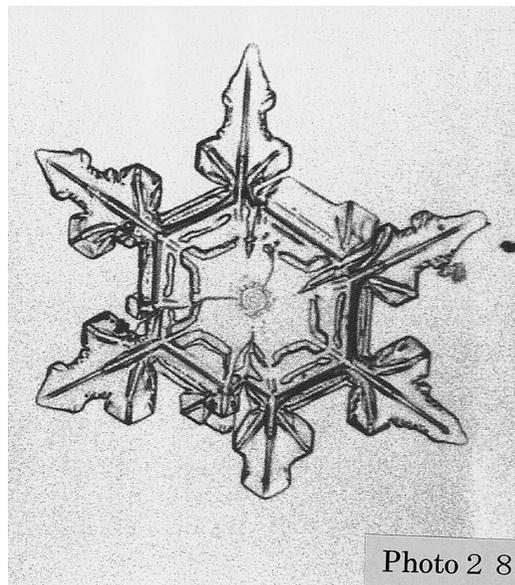


写真28

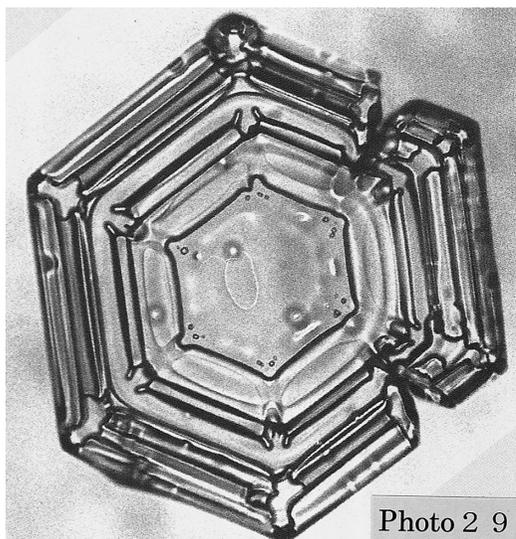


写真29

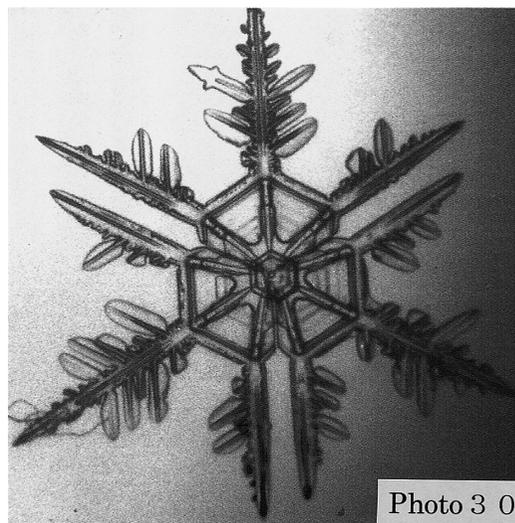


写真30

3. まとめ

天然で観察される雪結晶の中には、完全に六方対称性をもった結晶は少ない。中谷は非等方性の著しい結晶を畸形結晶と名付け、分類を

行った。中谷の分類に従って、改めて観察してみると、変形の原因として雲粒の付着凍結の影響が大きいことがわかった。また、三花・四花系の畸形結晶は凍結微水滴から樹枝が非等方的に成長して出来た結晶であることが、凍結微水

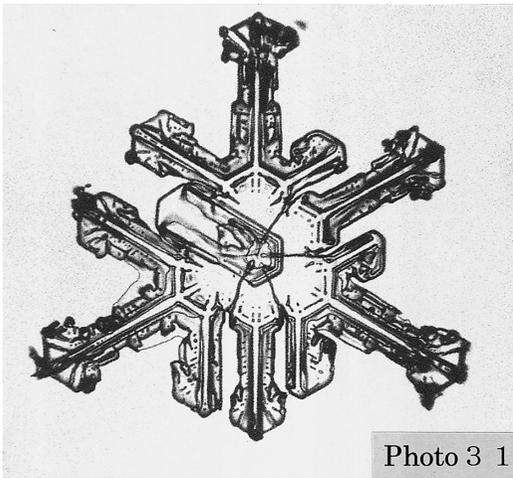


写真31

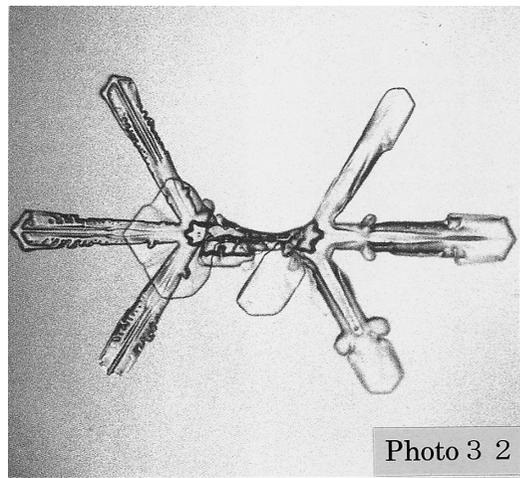


写真32

滴を成長させた実験から推察された。

謝辞

本文中で示した天然雪の結晶の写真は、毎年研究室で志賀高原に観測に行った時に、学生諸君や卒業生が撮影したものである。改めて、謝意を表す。

参考文献

小笠原 正, 1997 + 私信

Takahashi,C., 1975: Deformations of frozen water

drops and their frequencies., J.Meteor. Soc. Japan, Vol.53, 402-411

Takahashi,C., 1979: Formation of poly-crystalline snow crystals by riming process., J.Meteor. Soc. Japan, Vol.57, 458-464

Takahashi,C. and M.Mori, 2006: Growth of snow crystals from frozen water droplets. Atmos. Res., Vol.82, 385-390

中谷宇吉郎, 1994 : 『雪』 岩波文庫

(2009年9月30日提出)

(2009年10月16日受理)