雪片の分類と構造

孫野長治* 小口八郎**

Classification of Snow Flakes and their Structures

By C. Magono

Yokohama National University, Yokohama
and

H. Oguchi

Tokyo University of Arts, Tokyo

(Manuscript received July 30, 1954)

Abstract

Many snow flakes were photographed during 1951~1954 in Japan, and they were classified according to the purposes by four methods, i.e., their hystorical processes, shapes in falling state, sizes and crystal habits.

It was observed that the snow flakes change their crystal states in the process similar to that of the fallen snow. Considering aerodynamically, the shape and velocity of snow flakes in falling state, a clue for presuming the uniformity of crystal habits in snow flakes was acquired. In the photographs of snow flakes hitherto obtained, it was found that in all types of snow crystals one snow flake is formed with the respective type only, while another with almost all combinations between the different types is formed. All the ways geometrically possible for the adhesion of snow crystals, namely, top-top, top-surface, surface-surface, surface-edge line, line-line, intertwined adhesion were found in the snow flakes. The top of branch of dendritic crystals plays a leading role in the adhesion mechanism between the crystals.

From those results, it was presumed that the great snow flakes might be composed of snow crystals of dendritic type.

1. 序 論

雨滴の生成機構の説明には雪片も必要なことは Houghton¹⁾氏が指摘したが、雪片の量的な成長のみならず落下中の形、大きさ及びその構成結晶の結晶形を調べることは、雪片形成層以下における降雨機構の解明の一手段を提供する。1937年に Seligman²⁾氏がその著“Snow Strucure and Ski Field”***に写真の例をあげて雪片を形成する雪の結晶の附着のしかたについて簡単にふれており、また中谷教授の「雪の研究」³⁾には雪片を作り易い結晶形や温度条件が部分的に述べられてお

り、所載の顕微鏡写真中には雪片もまじっているので得るところが非常に多い。

雪片発生の原因としては Mason⁴⁾氏は雪の結晶の落下中の水平方向の相互の衝突をあげ、著者達の一人⁵⁾は結晶の種類、大きさの相異による落下速度の差から大雪片の発生し得ることを計算で示したが雪片の発生機巧を組織的に調べた例がないようである。

雪の結晶の附着による雪片の発生機巧を論じるには実際に附着してできた雪片の数多くの観測結果に基づくことが必要であろう。この目的で著者等が 1951 年から 1954 年にわ

* 横浜国立大学 ** 東京芸術大学

*** この書では Snowflake は単結晶をさし、雪片には Cluster of Snow Crystals を使っている。

たつて北海道及び本州で集めた写真による観測結果をまとめて報告する。そのために雪片を次のように分類して名前を約束する。

2. 雪片の分類

雪片とは2ヶ以上の雪の結晶の附着して降るものと決められているが、ここでは核の状態ですでに附着したものを、たとえば十二花、

立体樹枝及び畸形結晶はとりあつかわないことにする。雪片の状態の示しかたも目的によつていろいろあり、単なる構成結晶の結晶形だけでは不十分である。ここでは目的に応じて次のように、結晶形の時間的変態、落下中の形、大きさ及び構成結晶形の四通りの分類法をとることとする。

Table 1. Classification of snow flakes

分類法	名称	Term	Graphic Symbol	Photo. No.	Pl. No.	Method of Classification
時間的変態	新雪片	New snow flake	(*)	1	I	Hystorical process
	雲粒付	Rimed	(*)	2	I	
	昇華	Sublimated	(□)	3	I	
	粒状	Granulated	(○)	4	I	
	濡	Wet	(*)	5	I	
	水	Wetted	(*)	6	I	
落下中の形						Shape in falling State
	横型	Horizontal type	○	7	I	
	縦	Vertical	0	8	I	
	逆円錐	Inverted cone	▽	9	I	
大きさ						Size
	小 雪片	Small snow flake				
	大	Large				
	巨大	Great				>1 cm >4 cm
* 主な構成結晶の結晶形	角板	Plates		11	II	* Habit of crystals which occupy most of a snow flake.
	扇形	Sectors		12	II	
	平板樹枝	Stellar crystals		13	II	
	角柱	Columns		14	II	
	針	Needles		15	II	
	立体樹枝	Spatial dendrites		16	II	
	鼓	Capped columns		17	II	
	厚板	Thick plates		18	II	
	霰状	Graupel like crystals		19	II	
	霰	Graupel		20	II	
	不規則	Irregular crystals		21	II	

* 結晶形の分類は国際雪分類委員会⁶⁾のとり決めになぞられ、足りない分は中谷教授の分類法⁷⁾に従う。

Pl. I

(1) $\times 4.2$

(2)

(3) $\times 2.6$ (4) $\times 3$ (5) $\times 1.8$ (6) $\times 1.3$ (7) $\times 1.8$ (8) $\times 1.6$ (9) $\times 1.3$ (10) $\times 1.2$

3. 雪片の時間的変態, 落下中の形と大きさ

雪片が発生してから地上に到達するまでには融けて雨滴になる場合が多いわけであるから、急激ではあるが寒地に積つた積雪と同様な過程で変化すると考えられる。事実積雪変態で齊藤氏⁹⁾のあげられた状態に相当する過程は Photo. 1~6, Pl. I に示す如くすべて見附かつた。水雪片を示す Photo. 6 は印画紙法⁹⁾で撮つたもので、雨滴中に未融解の氷の含まれていることがわかる。

新雪片の密度¹⁰⁾は大きさにもよるが大体 $0.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以下で非常に軽く、落下速度も $1 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度である。この値は樹枝状単結晶の落下速度程度 $0.5 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ に比べて大きいようであるが、雪片が発生するような気象条件では多少の雲粒が附着するからであろう。雲粒付雪片にみられる雲粒は雪片の発生後に附着したものか雲粒付結晶が附着したものかは判定しにくい。密度は $0.01 \sim 0.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、落下速度は $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ である。昇華変態した雪片は観測例も少く雲粒付雪片との時間的前後は一概には云えない。粒状化雪片といつても積雪のザラメ雪ほど粒状化がすすんでいないし多少とけかかっていることが多い。濡雪片は雨滴と前後して又は一緒に降り、俗に霰とよばれるものにあたる。落下速度は $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ に及ぶ。とけ具合によつてはもつと速いものもあるかも知れないが水雪片と同様に観測が難しく、そういう測定結果はまだない。

動流体力学的に考えて落下中の雪片は、扁平な雪片はその平い面を水平に保ちながら、細長い雪片は長さの方向を水平に保ちながらひらひらと落ちる即ち横型が安定な筈である。しかし雪片には逆円錐型(横からはV字型にみえることが多い)になつて螺旋状に廻転しながら落ちるのも多く、また縦に長くて尾をふりながら蛇行して落ちる縦型もある。横型のはほぼ同種の結晶形から成り立つている

ことが多く時には二つの平板結晶が一点で連なつたまま、水平に並んで落下する。縦型は異種の組合せが多く重い方が下になり軽い方が尾となつて落ちる。Photo. 8, Pl. I はその極端な例であつて下側は霰、上側は平板樹枝である。逆円錐型は前の両型の中間状態と考えられるもので比較的重い結晶が下側になり、雪片の形が不規則なときには上側の一部が舵の役目をしながら螺旋状に落下し、その結果として Photo. 9, Pl. I にみられるような逆円錐型になるのであろう。Photo. 10 は縦型とも逆円錐型ともとれるが重い方が下側になつているのがよくわかる。

本来雪片は横型が安定な筈であるが、密度が不揃いであれば縦型に変つて不安定になり、しかも縦型は落下速度⁹⁾が大きいからますます不安定になる。また大きさと落下速度の関係⁹⁾をみると大きいほど速度も大になるが直径 4 cm 以上の巨大雪片になると反つて減小することからも大きな雪片は扁平な横型でしかも密度の様な軽い結晶から成り立つているものと想像される。結晶形については後に述べる。

4. 構成結晶の結晶形

同種の雪の結晶は同時に降ることが多いから、Pl. II に示すように同種結晶だけで形成された雪片がすべての結晶形について観測された。以下図版の写真順に説明すると、Photo. 11 は角板結合の雪片で辺と辺とで附着しているように見える。角板型の雪片は頻度も少くまた大雪片を作らない。Photo. 12 は扇形結合で枝先で附着している。Photo. 13 は平板樹枝からなる雪片で二ヶの結晶が重なり左上の小結晶は4本の枝で附着している。Photo. 14 は角柱結合の例であるが、角柱の両底面がやや横にのびて鼓型に近づいているから純粹の角柱とはいえない。純粹の角柱だけで果して雪片を形成するかどうかは観測例が少いので断定できないが、後で述べる

Pl. II

ようにこの型は附着しにくいようである。ただ一端の尖った砲弾型は、その尖端が附着力をもっているらしく「雪の研究 Photo. 666～671」に見られるようによく他の砲弾型の側面や底面に附着する。しかし砲弾型の尖端同志が附着しているのは一つの核から2ヶ以上の砲弾に生長したものと考えられるので此処では扱わない。「雪の研究 Photo. 669～679」。針結合の雪片を Photo. 15 に示すが、この型の結晶は比較的温暖な気象条件で降るためかよく雪片を形成する。ただし束になったり × 字型「雪の研究 Photo. 692, 704」になつていのは砲弾型の場合と同様に一つの核から発達したものであろう。Photo. 16 は放射状樹枝結合で、この型は形から予想されるように雪片として降る頻度も多く、また大雪片を形成する。Photo. 17 は鼓型結合の例で附着に寄与するのは写真でもわかるように平板結晶の部分である。Photo. 18 は不規則結晶からなる雪片であるが、この型の結晶はよく雪片を形成するがあまり大きくはならない。結晶のできる時の気象条件によるものであろう。Photo. 19 は厚板結合の例で三ヶ

の中一ヶが重なつている。Photo. 20 は霰状雪の結合で性質は放射状樹枝に似ている。Photo. 21 は2ヶの霰の結合であるが、霰の落下速度が大きく形の単純な割にはよく観測される型である。これには過冷却水滴が附着に効いているのであろう。国際雪分類委員による分類法にある“Sleet”は雨滴の再凍結した凍雨を意味しているが、わが国では極く稀にしか降らないらしく著者等は未だ観測していない。外国の写真でみると、どうもパラパラしたもので雪片をつくり難いように思われる。

すでにあげた例は凡て地上で受けとめた後まで附着状態を保持した雪片であるが、受けとめるときに衝撃で散乱する雪片もかなりあり、この傾向は厚板または霰状雪に多い。Photo. 22 はその一例であるが、衝撃が更に大きい筈の霰同志が附着したままで保持されるもののあるのは驚くべき附着力といわねばならない。

第2表に構成結晶形別にそれが形成する雪片の性質を示す。

Table 2. Character of snow flakes.

Habit of snow crystals forming a snow flake	Frequency*	Size of** snow flake	Adhesion force*** between crystals
Plates	rare	small	fragile fragile
Sectors			
Stellar crystals	often	large	
Columns	rare	small	
Needles			
Spatial dendrites	often	large	
Capped columns			
Thick plates			
Graupel like crystals			
Graupel			
Irregular crystals			

* often というのはその結晶形の雪片が多く観測されるという意味であつてこの結晶形が必ずしも雪片を作り易いことを示す訳ではない。

** large といつても小雪片を作ることも勿論ある。

*** 受けとめたときの脆さを示す。

5. 異種結晶からなる雪片

同種の結晶は同時に降るから附着し合つて雪片を形成するのは勿論であるが、同時刻に異種の結晶もまじつて降るから、結晶形の異つた雪の結晶からなる雪片も当然予期される。落下速度の相違による衝突が附着の原因であるとすれば、むしろ異種結合の雪片の方が多いと考えられる。そこでこの点に着目して雪片の結晶形をしらべてみると、第1図左方の実線で示すように殆んどすべての組合せの雪片が観測された。簡単のために扇形を角板にふくめ、厚板と霰状雪を雲粒付にまとめ、温度湿度条件の似たものが近くになるように並べ変えてある。コ字型の線は写真で確認された二種の結晶形の組合せを示し、線の太さはその組合せの大体の頻度を表わす。ここでいう頻度も、そういう写真例が多いということであつて、その種の結晶の降る頻度とあまり意味が変わらない。このことは第2表の同種結合の頻度と大体一致することからも理解される。第1図で不規則結晶が殆んど結晶形と結付いて雪片を作っているのが目立つが、不規則結晶は文字通り

Fig. 1

Table 3. Meteorological condition and falling velocity of snow crystals.

Crystal habit	Air temperature (°C)	Vapor supply	falling velocity (m sec ⁻¹)
Needle	-1~-4		0.3~0.6
Irregular needle	-4~-7		
Column	-9~-12, -17~-21	little	
Plate, sector	-11~-14, -17~-19	little	
Dendritic plane	-14~-19	much	0.3
spatial	-14~-19	much	0.5
capped	-14~-19	much	
Thick plate (rimed)	-9~-14, -17~-19	with cloud particles	0.6~1.8
Graupel like		with cloud particles	
Graupel	relatively warm	with cloud particles	1~2.5
Irregular			0.6

Pl. III

形がはつきりしないために主観の入りやすいこと、写真判定の困難なために見掛上多くなっているかも知れない。特に受けとめた時に破片となつたものは判定が難しい。一方、不規則結晶は無意識的に採取されない傾向がある。

似た気象条件で成長する結晶形の組合せの多いことは当然であるから、気象条件のかけはなれていると考えられるものの組合せについて考察しよう。Pl. III の Photo. 23 は針と不規則結晶の組合せであるが、この不規則結晶は周囲にある雪から考えて霰状雪に近いものであろう。こう考えれば気象条件は似て

くる。Photo. 24 は広幅六花に角板と鼓とが附着したものであるが、鼓の平板部分は恐らく広幅六花であろう。角板・広幅六花はいずれも水蒸気供給の少いときに出来る結晶形であるから上のように考えれば説明がつく。Photo. 25 は角板と不規則結晶の結合であるが、後者も部分的には角板である。Photo. 26 の上方が立体樹枝で右下方は平板樹枝であり、枝同志がそれぞれの枝先で附着し合っている。Photo. 27, 28 はそれぞれ霰状雪、平板樹枝と霰との結合である。平板樹枝は比較的静かで気温の低い時($-14 \sim -17^{\circ}\text{C}$)に成長し、霰は上昇気流の盛んな時に成長してしかも急激に降り、樹枝状雪に比べれば本州でも

Top-top

Top-surface

Surface-surface

Surface-edgeline

Line-line

Interwinded

Fig. 2

やや気温の高い時に観測されるから、両者の成長条件はよほど異なると考えられるにもかかわらず、Photo. 8, Pl. I, Photo. 33, Pl. IV. にもみられるようにこの型の組合せの少くないことは霰と樹枝雪との間に特に強い附着力のあることを思わせる。気象条件が隔たつていても霰のほうが上層で発生すれば、落下速度に大きな差があるから衝突の機会のあることは確かであるが、このほかに附着力そのものも関係しているので後でふれる。霰と樹枝状雪の組合せに限らず異種の結晶形からなる雪片が観測されれば、落下速度の大きい方の結晶は上方で発生したことを意味している訳である。結晶形の成長に適した気象条件^{7,12)}と

落下速度^{13,14)}を既に発表された論文から抜粋して第3表に示す。

6. 雪片の附着のしかた

結晶相互の附着のしかたを幾何学的に頂点—頂点、頂点—面、面—面、辺—面、辺—辺、からみ合い及び不規則の七つに大別して、これらを更に細別すると第4表及び第2図のようになる。

i 頂点と頂点

枝先と枝先とが附着し合うとき、1本ずつであろうと2本以上であろうと区別する必要がないかも知れないが、せん細な1本の枝先で落下後にも結合を保持しているのは注目すべきことであり、この例は意外に多い。また Photo. 31, Pl. III にみられるように附着後に昇華によつて結合部が太く強固になるようであるが、斉藤氏⁹⁾が積雪で指摘されたブリヂ機構と同じようなことが降雪中にも行われる訳である。

2本以上の枝が偶然に附着することもある

が Photo. 30 でもわかるように両者の元の枝の方向が一致するように附着する傾向もある。1本で附着する場合にも方向の一致する例も稀には観測されるが、偶然の附着後にも結晶の方向性が影響するのかも知れない。

平板状結晶は Photo. 32 に示すようにある角度をなして附着することも多い。従つて平板状結晶だけでも軽くて容積の大きな雪片を作る可能性がある。

角板は Photo. 24, 25, Pl. III に示す如く頂点同志でよく結合する。ただ砲弾型にみられる頂点同志の結合は一つの核から発生したものらしいことは前に述べた通りである。

ii 頂点と面

枝先と曲面の結合は Photo. 8, 28 に示されているように樹枝状雪と霰との附着の際によく現われるもので結合力が非常に強い。

頂点と面の結合は円錐形の霰や砲弾型の結晶が他の結晶に附着するときに多い。

iii 面と面

Photo. 13, 19 のように見かけ上、平板結

Table 4. Methods of adhesion between two snow crystals.

Method of adhesion	Photo. no.
Top—top	
one branch—one branch	29, 31
branches—branches	2, 16, 23, 26
at same plane,	1, 30
at different planes	32
top—top	24, 25
Top—surface	
branch—surface	8, 28
top—surface	21
Surface—surface	
lying upon another	13, 19
curved surface—curved surface	15
curved surface—plane	33
Surface—edge line	14, 17
Line—line	11
Interwinded	
Irregular	18, 20

晶が重なり合つていても完全に面接触をしている訳ではなくて、附着に寄与するのはやはり小突起か枝先であろう。二核結晶の十二花に近いものは別問題である。

Photo. 15 に示す針状結晶の一本一本は細い円筒形とみられるから、交叉すれば曲面と曲面の接触になる筈である。砲弾型でも側面同志で附着したものが稀には観測されている、「雪の研究 Photo. 668」。

稀には霰と樹枝状雪が結合するときに Photo. 33, Pl. III のように平面と曲面とが附着する。しかしこの場合は実際は霰の表面の小突起が附着に寄与しているのであろう。

iv 面と稜線

鼓型に生長しかけた角柱結晶が他の角柱と結合するときには Photo. 14, 17, Pl. II にみられるように底面の縁が他の角柱の面に附着する。

v 線と線

Photo. 11, Pl. II は角板同志が縁で附着し合つたものであるが非常に珍しい例である。

vi からみ合い

枝先結合でふれたように枝先は非常な附着力を有するから、結晶が結合する際に枝先をさしおいて枝の交叉でからみ合うとは考えにくい。「雪の研究 Photo. 317, 319, 321」に見られるようなからみ合いは附着後に枝が発達したものであろう。

vii 不規則結合

雪片が多くの結晶から成立つている時には、相互の位置の関係で不規則に附着し合うことも当然考えられるし、大雪片ではこの種の結合法が多いであろう。

7. 雪片の結合力と巨大雪片

前節でのべたように雪片の附着に寄与するのは殆んど枝先または頂点である。枝先や頂点は結晶の最外側にあたるから、他の結晶との接触部になるのは当然であるが、附着後の結合力については次のように考えられる。

非常に細い凸起部が他と接触すれば機械的な圧力や摩擦熱で先端に一時的な融解と再凍結が考えられる。またこの部分の曲率半径の小さいことから、昇華によつてそこに強固なブリヂが作られるであろう。昇華のすすむに従い構造の微細部は消滅して丸味をおびてくることは積雪の場合について齊藤・小島の両氏によつて確められている。先端部は枝先と限つた訳ではなく凍結した過冷却水滴も似たような働きをすると思われる。

先端部の結合についても一つ考えられるのは降雪の帯びている荷電によるクーロン力である。降雪は雨滴に劣らず荷電をおびるし、それが先端部に集中するから、符号が異なれば大きな吸引力となる筈である。過冷却雲粒で成長する霰は Workman, Reynolds 効果¹⁵⁾によつて負に帯電すると考えられるから、霰と樹枝雪との附着の際にはクーロン力が働くと思われ。

先端部が附着の主な役目を果たすすれば、枝先の多い樹枝状雪の雪片の多いことは当然であり、第1図もこれを裏書しているが、樹枝状雪片の多い理由に次のことが考えられる。

i) 樹枝状雪の発達する $-14 \sim -17^{\circ}\text{C}$ という気象条件は、また氷に対する過飽和度の最大の温度範囲で結晶の成長速度の最も大きい範囲に一致するから結晶の空間密度も大きい。すなわち衝突の機会の多いことを意味する。著者の一人⁹⁾の計算によれば雪片の大きさは結晶の空間密度の3乗に比例する。

ii) 樹枝状雪は軽くて大きな雪片を形成するから他の単結晶と衝突する際の断面積が大きい。個々の単結晶でも樹枝状は落下の際の断面積は最大である。

iii) 樹枝状雪は落下速度がおそく空間に浮遊する時間が長いことも衝突の機会を多くする。

vi) 雪片が形成し始めるのは大体 -10°C

線⁵⁾と考えられるが、樹枝雪の温度条件のすぐその上にあたる。

岡田武松先生の「雨」¹⁶⁾に直径 10 cm 以上の巨大雪片の例が多数記載されている。かかる巨大な雪片は単結晶の空間密度が大きいとか、風が弱いとか、気温、結晶とかの好条件が揃わなければ形成されないが、後の二つについて考察してみよう。

地上気温が高いほど雪片成長の気層が厚いわけであるが、0°C 以上になれば融けて収縮を始めるし、落下速度の増大のために不安定になつて分裂するとも考えられる。また零下では温度が高いほど部分的な融解で附着力が強い。従つて地上気温が 0°C に近いときが最も好条件であり、地上気温と雪片の大きさとの関係を実測した結果⁵⁾も以上のことを裏書きしている。

構成結晶の結晶形については筆者等の観測したところでは 4 cm 以上の雪片はすべて樹枝状雪またはそれらの時間的変態とみられるものばかりであつた。この理由については上に考察したとおりである。

本研究は中谷教授の「雪の研究」から思い立つたもので、随所に引用した如く非常な参考になつた。記して深甚の謝意を表わす次第である。また影写真 Photo. 12, 29, 30 の掲載を承諾された樋口敬二氏、観測の便宜を与えられた雪実験所及び北大中谷教室の諸氏、観測と整理を援助された荒井・中山の両氏に深く感謝する。

本研究は科学研究費によつて行われたものである。

文 献

1. Houghton, H.G. (1950): A preliminary quantitative analysis of precipitation mechanism. *J. Met. Amer.* 7, 363-369.
2. Seligman, G. (1936): *Snow Structure and ski field*, MacMillan, London, 23.
3. 中谷宇吉郎 (1949): 雪の研究, 岩波, 19.
4. Mason, J.S. (1950): The formation of ice crystals and snow flakes. *Centenary Proc. Roy. Met. Soc.*, 51-58.
5. Magono, Chōji. (1953): On the growth of snow flakes and graupel. *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ.*, Sec. I, No. 2, 18-40.
6. International Commission on Snow and Ice, Committee on Snow Classification (1950): Tentative snow classification.
7. Nakaya, U. (1951): The formation of ice crystals, *Compendium of Meteorology*, 207-220.
8. Saitō, R. (1949): Physics of fallen snow, *Geophysical Magazine*, 19, 1-56.
9. 孫野長治 (1953): 巨大降水要素の容積分布, 気象集誌, 第2輯, 31巻, 287-297.
10. Magono, C. (1954): On the falling velocity of solid precipitation elements, *Sci. Rep. Yokohama Nat. Univ.*, Sec. I, No. 3, 33-40.
11. 小島賢治 (1952): 雪の結晶の変形, 低温科学, 第9輯, 187-203.
12. Gold, L.W. and B.A. Power (1954): Dependence of the forms of natural snow crystals on meteorological conditions, *J. Met. Amer.*, 11, 35-42.
13. 中谷宇吉郎 (1949): 雪の研究, 岩波, 56.
14. 孫野長治 (1953): 雪片の落下速度, 雪氷の研究, 日本雪氷協会, No. 1, 19-28.
15. Workman, E.J. and S.E. Reynolds (1950) Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solution and their possible relationship to thunderstorm electricity, *Phys. Rev.* 78, 254-259.
16. 岡田武松 (1951): 雨, 岩波, 105.