論文

雪片の構成因子の観測

梶川正弘¹⁾, 成田栄子²⁾, 一関景子³⁾,
工藤貞子⁴⁾, 佐々木るみ子⁵⁾

要 旨

雪片の構成因子（構成雪結晶の数，形，粒径など）を明らかにするため，雪片を個々の結晶にほぐす方法（分離法）による観測を行い，以下の結果を得た．

構成結晶数が同じ場合，雪片の粒径は結晶の平均粒径が大きいほど大きくなること，樹枝状結晶は放射状結晶よりも平均粒径が大きいので，大きい雪片を形成することが確認された．

雪片の粒径は構成結晶の平均粒径をパラメータとして結晶数のべき関数で表され，この関係は構成結晶数10個未満とそれ以上とで異なった．雪片の形状を仮定した簡単なモデルによる考察から，前者の関係は外形が平板状に近い付着の仕方を反映していること，後者は球状雪片に対応していることが示唆された．

キーワード：雪片，雪結晶，雪片形成

Key words: snowflakes, snow crystals, aggregation of snow crystals

1. まえがき

雪片の構成因子，即ち構成雪結晶の数，形，粒径などの情報は，降雪粒子の成長過程を解明するための基礎として重要である．しかしながら，孫野・小口（1955），樋口（1955）およびHiguchi（1960）による結晶の付着特性の観測・研究以後，この延長線上の観測例は少ない．

Rogers（1974）は雪片形成と成長に関する諸問題を幅広く論じた中で，最大100個の結晶から成る雪片を分離することにより，構成要素の特性を述べた．また，対馬ら（1987）は，最大400個を超える結晶から成る雪片を分離し，結晶形および数と雪片の質量との関係を調べた．その結果によ

ると，全雪片の66%が樹枝状結晶から，15%が扇形結晶から構成されており，結晶1個当たりの質量はそれぞれ0.04 mgと0.01 mgであった．

一方，Fujiyoshi（1985）は雪片の分離法により，構成結晶形や雲粒付着の程度の時間変化と降水強度の関係を論じた．また，Harimaya and Sato（1989, 1992）は同様の方法により，結晶の付着雲粒量を基に，降雪粒子の質量成長に占める雲粒捕捉過程の割合を評価した．これらの研究では，構成結晶の付着雲粒量の評価に重点がおかれ，元の雪片と構成結晶の粒径分布の関係には触れられていない．

本研究の目的は，個々の雪片の分離法により，構成結晶の数，形，粒径および質量と元の雪片の粒径および質量を同時観測し，それらの相互関係を明らかにすることにある．

この種の観測では，衝突・分裂によって構成結晶数の少ない雪片が形成初期の雪片としてデータに混入するおそれがある．本観測は構成結晶数が数個から数十個の雪片を対象とし，山間部で弱風かつ弱い降雪時に実施したので，分裂後の雪片が

1) 秋田大学工学資源学部

〒010-8502 秋田市手形学園町1-1

2) 飯島南小学校

〒011-0911 秋田市飯島字西袋263

3) 十和田小学校

〒018-5334 鹿角市十和田毛馬内字上新田1-1

4) 崇徳小学校

〒016-0151 能代市松山字寺田4-8

5) 内小友小学校

〒014-0073 大曲市内小友字四ッ村35

混入した可能性は少ないと考えられる。

2. 観測方法

シリコンオイル (KF-10) を少量入れた内径 9.3 cm のガラス製シャーレを用いて、受け取る雪片の個数を可能な限り少なくし、そのうちの1個を細く削った竹串で個々の結晶に分離した。次に、それらの結晶を弱い電熱、または指先で融かして球状水滴とした。写真撮影は雪片、雪結晶および融解水滴の三段階で順次行った。なお、構成結晶数が5個程度までの雪片については、採取時の衝撃で壊れる度合いが少なかったもので、黒布上に受け取った後、撥水処理したガラス板上に移す方法も併用した。シャーレの内側とガラス板の撥水処理は、ポリスチロールの2% (重量) 二塩化エチレン溶液の塗布による。このようにして得られた写真の例を図1に示す。

引き延ばした写真から雪片の粒径、雪結晶の粒径、融解径 (相当水滴径)、結晶形および数を求めた。雪片の融解水滴径は、結晶の融解水滴を合計して求めた。粒径が小さいため分離できなかった結晶や壊れた枝は、既存の粒径と質量の関係 (Kajikawa, 1972) を利用して、それに相当する質量部分を補正した。これらの観測は、秋田県鹿角市八幡平の標高 325 m および 1200 m の観測施設で、1983 年、1984 年、1987 年および 1999 年 1 月に実施した。観測時の気温は、 $-5 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 程度であった。

3. 結 果

3.1 構成結晶数 2 個および 3 個から成る雪片の付着特性

雪片形成と成長の初期過程をさぐるうえで、少数の結晶の付着特性は重要な情報である。構成結晶 2 個から成る雪片の付着様式は、(Higuchi, 1960) で定義された因子 S (図 2) で表すことができる。ここで、 $S=0$ と 1 は、それぞれ両結晶の中心が一致するような付着と枝先どうしの付着を意味する。

図 3 は代表的な結晶形 (分類法は Magono and Lee, 1966 による) である樹枝状 (普通樹枝のみでなく広幅、星状、羊歯状および変遷六花を含む) と放射状 (放射樹枝と放射角板) に対する S の頻

図1 雪片の分離と融解過程の一例。

Fig. 1 An example of the separated snowflake and melted component crystals.

度分布である。樹枝状結晶のピークは 0.5 付近なのに対して、放射状結晶は 0.9 にピークを持ち、両者の違いが明瞭に現れている ($S > 1$ が存在するのは、結晶の枝の長さの不均一による)。即ち、放射状に枝が伸びた結晶では両者が枝先近くで付着するため、 S は 1 に近くなるが、平板状に枝が伸びた樹枝状結晶は、ある程度重なって ($S = 0.5$ 程度) 付着することになる (Higuchi, 1960)。ただし、同じ板状結晶でも、外形の細部が同じ結晶形どうしの 2 個付着雪片では、 $S = 0.3$ 付近にピークが現れる (Kajikawa, 1985)。

3 個から成る雪片の付着様式を表す因子として、図 4 のように 3 結晶の中心間の距離で 3 辺を

図2 樹枝状結晶2個から成る雪片の観測例。Sは付着状態を表す因子 (Higuchi, 1960)。ここで、 d_1 と d_2 および l は、それぞれ結晶の外接円の直径 (結晶の粒径) と中心間の距離。

Fig. 2 An example of snowflakes consisting of two dendritic type crystals. S is a measure of the combined state of two crystals (Higuchi, 1960), where d_1 and d_2 are the diameters of two crystals, and l is the distance between their centers.

構成する三角形の面積 A を定義する。この三角形は直角三角形のときに面積が最大となり、その値を A_{max} とする。面積最大値 A_{max} に対する A の比の頻度分布を図5に示す。 A/A_{max} は0~0.2までで半数以上を占めている。これは二つの結晶の中心線上の近くに第3番目の結晶の中心がくるように付着しやすいことを意味する。

3.2 雪片の粒径と構成結晶の粒径および数の関係

雪片の粒径 d_f は、写真上の雪片に外接する楕円の長径と短径の和の半分とした。図6は構成結晶

図3 樹枝状および放射状結晶各2個から成る雪片に対する S の頻度分布。 n は観測雪片数。

Fig. 3 Frequency distribution of S in snowflakes consisting of both dendritic type crystals and of radiating type crystals. n is the observed number of snowflakes.

数 N に対する結晶粒径 $\bar{d}_c$ の分布変化の一例である。個々の雪片の構成雪結晶の平均粒径を $\bar{d}_c$ とし、その範囲を図の上部に示している。また、全結晶の平均粒径を矢印で示す。構成結晶数 N が数個のときは、分布が平均の周りに集中するのに対し、 N が増加するとこの傾向は無くなり、分布範囲も若干広がる傾向がみられる。このことは、雪片形成と成長の初期段階では結晶相互の速度差が小さいために、振動などの二次運動 (例えば、Kajikawa, 1992; Kajikawa and Okuhara, 1997) や両結晶まわりの流れの相互作用による集合過程 (衝突・付着過程) が卓越し、その後次第に落下速度差による慣性衝突・付着過程が優勢になることを示唆している。

構成結晶の平均粒径 $\bar{d}_c$ を1 mm 毎に区切り、構成結晶数 N と雪片の粒径 d_f の関係を図7に示す ($N=2$ の全部と $N=3$ の一部は、測定数が多いので表示を省略した)。構成結晶の粒径が大きいほど、同じ結晶数から成る雪片の粒径は明らかに大きい。これは Rogers (1974) や Hobbs *et al.*

図4 結晶3個から成る雪片の観測例。Aと A_{max} は、それぞれ3結晶の中心で構成される三角形の面積とそれが直角三角形をなすときの面積最大値。 d_1, d_2, d_3 :各結晶の粒径。 l_1, l_2, l_3 :各結晶の中心間の距離。

Fig. 4 An example of a snowflakes consisting of three crystals. A and A_{max} are the area of a triangle surrounded by three crystal centers and the maximum value of A, respectively. d_1, d_2, d_3 : diameters of crystals. l_1, l_2, l_3 : distances between center of crystals.

(1974)の観測結果と同様である。さらに、 N に対する d_f の増加の仕方に注目すると、 $N=10$ 程度を境として、初め急で後になるほど緩やかになる傾向がみてとれる。これは後述の考察で述べるように、初期の雪片の外形は平板状で、成長と共に次第に球形に近づく（例えば、孫野・小口, 1955; Magono and Nakamura, 1965; Kajikawa, 1982; Ishizaka, 1993）ことと関係している。

図7の破線と実線は、それぞれ構成結晶数 N が9個までと10個以上のデータに対する最小2乗法で得られた実験式によるものである。以下に示す N のべき関数の実験式は、結晶の平均粒径 $\bar{d}_c$ の2,3および4の段階について、雪片の観測個数が多い場合のみ計算された。

結晶平均粒径の段階2: $0.5 \text{ mm} \leq \bar{d}_c < 1.5 \text{ mm}$

$$A = \sqrt{s(s-l_1)(s-l_2)(s-l_3)}$$

$$2s = l_1 + l_2 + l_3$$

$$A_{max} = \frac{1}{8}(d_1+d_2)(d_1+d_3)$$

$$d_1 > d_2 > d_3$$

$$d_f = 1.11N^{0.630}$$

$$(2 \leq N \leq 9, \text{ 雪片数 } n = 38,$$

$$\text{相関係数 } r = 0.82) \dots\dots\dots (1)$$

$$d_f = 2.14N^{0.301}$$

$$(10 \leq N \leq 48, n = 37, r = 0.59) \dots\dots\dots (2)$$

$$3 : 1.5 \text{ mm} \leq \bar{d}_c < 2.5 \text{ mm}$$

$$d_f = 1.64N^{0.626}$$

$$(2 \leq N \leq 9, n = 121, r = 0.81) \dots\dots\dots (3)$$

$$d_f = 3.18N^{0.306}$$

$$(10 \leq N \leq 48, n = 31, r = 0.74) \dots\dots\dots (4)$$

$$4 : 2.5 \text{ mm} \leq \bar{d}_c < 3.5 \text{ mm}$$

$$d_f = 2.46N^{0.534}$$

$$(2 \leq N \leq 9, n = 73, r = 0.76) \dots\dots\dots (5)$$

図 5 A/A_{max} の頻度分布. n は観測雪片数.

Fig. 5 Frequency distribution of A/A_{max} .

3.3 雪片の構成結晶形の特徴

雪片を構成する結晶の数と同じでも、結晶形が異なるとパッキングのされ方が異なり、雪片の粒径に差が生ずると考えられる。構成結晶の中で最も数の多い結晶形をその雪片の卓越結晶形と定義して、図 7 の 1~5 段階でその頻度を集計してみた (表 1)。ここで、構成結晶数が偶数で卓越結晶形が同数になるものは除かれている。表によると、平均粒径の大きいカテゴリーには、放射状結晶よりも樹枝状結晶の卓越した雪片が相対的に多くなっている。この結果と雪片の粒径との関係は、後の考察で述べる。

4. 考 察

外形が球状または板状の簡単な雪片モデルにより、3.2 節で得られた実験式の意味を考察する。粒径 d_j の球状雪片が粒径 d_c の球状結晶 N 個から成ると仮定すると、次式が成り立つ (Magono, 1953)。

図 6 構成結晶数 N に対する結晶粒径 d_c の頻度分布の変化. 矢印と $\bar{d}_c$ は、それぞれ全結晶の平均粒径と個々の雪片の構成結晶の平均粒径.

Fig. 6 Frequency distribution of the diameters d_c of component crystals for each number N of crystals in a snowflake. Arrows and $\bar{d}_c$ show the average diameter over all component crystals and the average diameter of component crystals of individual snowflakes, respectively.

$$\begin{aligned} (4/3) \pi (d_j/2)^3 &= k (4/3) \pi (d_c/2)^3 N \\ \therefore d_j &= k^{1/3} d_c N^{1/3} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ここで、 k は構成結晶のパッキングの度合い (空隙の度合い) を表す定数で、結晶形の他に d_c

図7 雪片の粒径 d_f と構成結晶数 N との関係。

Fig. 7 Relationship between the snowflake diameter d_f and the number N of component crystals.

表1 卓越結晶形別に集計した結晶の平均粒径毎の観測雪片数。

Table 1 Number of observed snowflakes in each dominant type of component crystals.

Dominant type	Range of average diameter of component crystals					Total
	$\bar{d}_c \leq 0.5$	$0.5 < \bar{d}_c \leq 1.5$	$1.5 < \bar{d}_c \leq 2.5$	$2.5 < \bar{d}_c \leq 3.5$	$3.5 < \bar{d}_c \leq 4.5$	
Dendritic crystals	0	8	34	28	6	76
Rimed dendritic crystals	0	4	29	17	7	57
Radiating crystals	4	21	16	0	0	41
Rimed radiating crystals	2	15	6	0	0	23
(Snowflakes including a graupellike snow)	0	2	6	0	0	8

と N , 特に d_c にも依存すると考えられるが, 議論の単純化のために結晶形によると仮定する. この式によると d_f は d_c と N の $1/3$ 乗の積に比例することになる.

一方, 粒径 d_f の球状雪片が粒径 d_c の板状結晶 N 個から成ると仮定すると, 次式が成り立つと考えられる.

$$(4/3) \pi (d_f/2)^3 = k\pi (d_c/2)^2 hN$$

$$\therefore d_f = \{(3/2) kh\}^{1/3} d_c^{2/3} N^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

ここで, h は結晶の厚みであり, 樹枝状結晶では粒径によらずほぼ一定と置ける (例えば, Kajikawa, 1972). これらの式によると, d_f は d_c の $2/3$ 乗と N の $1/3$ 乗の積に比例することになる. 構成結晶数の多い場合の実験式 (2) および (4) と比較すると, N のべき指数は 0.301 と 0.306 であり, 球状モデルの $1/3$ に近い.

次に, 板状雪片モデルを考える. 粒径 d_f の板状雪片が粒径 d_c の球状結晶 N 個から形成されると仮定すると, 次式が成り立つ.

$$\pi (d_f/2)^2 H = k (4/3) \pi (d_c/2)^3 N$$

$$\therefore d_f = (2k/3H)^{1/2} d_c^{3/2} N^{1/2} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 H は雪片の厚みである。もしも H が d_f と N に無関係とすると d_f は d_c の $3/2$ 乗と N の $1/2$ 乗の積に比例することになる。

一方、粒径 d_f の板状雪片が粒径 d_c の板状結晶 N 個から形成されるときは、次式が成り立つ。

$$\pi (d_f/2)^2 H = k\pi (d_c/2)^2 hN$$

$$\therefore d_f = (kh/H)^{1/2} d_c N^{1/2} \dots \dots \dots (9)$$

この板状雪片モデルによると、もしも H が d_f と N に無関係とすると d_f は d_c と N の $1/2$ 乗の積に比例することになる。これら二つのモデルは構成結晶数の少ない場合の実験式 (1), (3) および (5) と比較すると、 N のべき指数のずれが大きい。また、式 (8) と (9) において H が N のある関数で増加するとした場合、 N のべきは $1/2$ より小さくなり、実験式とのずれはさらに大きくなる。以上のことから、板状雪片の厚さを導入したこれらのモデルは、観測結果に適合しないと考えられる。

そこで、構成結晶数の少ない場合の実験式 (1), (3) および (5) の意味を考えるために、雪片の粒径 d_f を次のように仮定してみる。

$$d_f = A (d_c N)^B \dots \dots \dots (10)$$

ここで、 A と B は結晶の付着特性 (重なり具合) による定数とする。いま実験式 (1), (3) および (5) により、 B を $3/5$ と仮定すると、 A は 1.11, 1.08 および 1.27 となり、ほぼ 1 に近くなる。一方、結晶 2 個の付着特性 (図 3) によると、樹枝状の場合には両結晶中心間の距離は $0.5 d_c$ 程度となる。したがって、2 個の同一粒径から成る雪片の粒径 d_f は、長径が $1.5 d_c$ となり短径を d_c として、その平均の $1.25 d_c$ となる。雪片の粒径は $d_c = 1, 2$ および 3 mm で、それぞれ $d_f = 1.25, 2.50$ および 3.75 mm である。実験式 (1), (3) および (5) では、それぞれ $d_f = 1.72, 2.35$ および 3.49 mm となる。

一方、放射状の場合は重なりが少ないので、中

心間距離は $0.9 d_c$ 程度となり、雪片の粒径 d_f は樹枝状の場合と同様の計算で $1.45 d_c$ となる。したがって、 $d_c = 1, 2$ および 3 mm で、それぞれ $d_f = 1.45, 2.90$ および 4.35 mm となる。以上の概算から、観測結果は $d_c = 1 \text{ mm}$ では比較的放射状の仮定に近く、 $d_c = 2 \text{ mm}$ と 3 mm では樹枝状の仮定に近い。このことは、表 2 に示したように平均粒径の大きいカテゴリーには、放射状結晶よりも樹枝状結晶の卓越した雪片が相対的に多くなっていることと矛盾しない。

3 個から成る雪片では、図 5 によるとその中心が同一線上近くに配置して付着していることが多い。そこで、同じ d_c の板状結晶 3 個が付着した場合の雪片の粒径 d_f は、長径が $2 d_c$ となり短径を d_c として、その平均の $1.5 d_c$ となる。放射状結晶の場合も同様の計算で、雪片の粒径 d_f は $1.9 d_c$ となる。したがって、雪片の粒径 d_f は板状結晶の $d_c = 1, 2$ および 3 mm で、それぞれ $d_f = 1.5, 3.0$ および 4.5 mm である。放射状結晶ではそれぞれ $d_f = 1.9, 3.8$ および 5.7 mm となる。一方、実験式 (1), (3) および (5) によると、それぞれ $d_f = 2.22, 3.26$ および 4.42 mm である。これらの概算から、 $d_c = 1 \text{ mm}$ では比較的放射状の仮定に近く、 $d_c = 2 \text{ mm}$ と 3 mm では樹枝状の仮定に近いことがわかる。

以上の 2 個と 3 個から成る雪片の d_f の概算によると、構成結晶数の少ない場合 ($N < 10$) の実験式 (1), (3) および (5) は、2 次元的に広がった (板状に近い) 付着の仕方を反映していると考えられる。

5. ま と め

分離法により、主に樹枝状結晶と放射状結晶から成る雪片の構成因子の観測を行い、以下の結果を得た。構成結晶数が同じとき、雪片の粒径は結晶の平均粒径が大きいほど大きくなる。また、雪片の粒径は構成結晶の平均粒径をパラメータとして、結晶数のべき関数で表される。この関係式は構成結晶数が 10 個以上では、球状雪片の簡単なモデルでほぼ説明できる。一方、構成結晶数が 10 個未満の場合には、板状に近い 2 次元的に広がった付着の仕方を反映している。

謝 辞

観測にあたり、施設の使用等に便宜をおはかり
頂いた秋田県鹿角市役所の関係部署に深く感謝い
たします。

文 献

- Fujiyoshi, Y. and Wakahama, G., 1985: On snow particles comprising an aggregate. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1667-1674.
- Harimaya, T. and Sato, M., 1989: Measurement of the riming amount on snowflakes. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **8**, 355-366.
- Harimaya, T. and Sato, M., 1989: The riming proportion in snow particles falling on coastal areas. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 57-65.
- 樋口敬二, 1955: 雪の結晶の大きさ及び雪片の構成要素について. *気象集誌*, **33**, 9-22.
- Higuchi, K., 1960: On the coalescence between plane snow crystals. *J. Meteor.*, **17**, 239-243.
- Hobbs, P. V., Chang, S. and Locatelli, J. D., 1974: The dimensions and aggregation of ice crystals in natural clouds. *J. Geophys. Res.*, **79**, 2199-2206.
- Ishizaka, M., 1993: An accurate measurement of densities of snowflakes using 3-D microphotographs. *Annals of Glaciology*, **18**, 92-96.
- Kajikawa, M., 1972: Measurement of falling velocity of individual snow crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 577-584.
- Kajikawa, M., 1982: Observation of the falling motion of early snow flakes. Part I. Relationship between the free-fall pattern and the number and shape of component snow crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 797-803.
- Kajikawa, M., 1985: Structure and falling motion of early snowflakes. *Annals of Glaciology*, **6**, 269-271.
- Kajikawa, M., 1992: Observation of the falling motion of plate-like snow crystals. Part I: The free-fall patterns and velocity variation of unrimed crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 1-9.
- Kajikawa, M. and Okuhara, K., 1997: Observation of the falling motion of plate-like snow crystals. Part II: The free-fall patterns and velocity variation of rimed crystals. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 811-818.
- Magono, C., 1953: On the growth of snow flakes and graupel. *Sci. Rep., Yokohama Nat. Univ., Sec. I, No. 2*, 18-40.
- 孫野長治・小口八郎, 1955: 雪片の分類と構造. *気象集誌*, **33**, 56-67.
- Magono, C. and Nakamura, T., 1965: Aerodynamic studies of falling snowflakes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **43**, 139-147.
- Magono, C. and Lee, C. W., 1966: Meteorological classification of natural snow crystals. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **2**, 321-335.
- Rogers, D. C., 1974: The aggregation of natural ice crystals. *Rep. No. AR110, Dep. Atmos. Resources, Univ. of Wyoming*, 35pp.
- 対馬勝年・川田邦夫・中川正之, 1987: 降雪粒子の研究. 富山の雪の研究, 13-17.

Observation of composition factors of snowflakes

Masahiro KAJIKAWA¹⁾, Eiko NARITA²⁾, Keiko ICHINOSEKI³⁾,
Teiko KUDO⁴⁾ and Rumiko SASAKI⁵⁾

1) Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, Akita 010-8502

2) Iijima-minami Elementary School, Akita 011-0911

3) Towada Elementary School, Kazuno 018-5334

4) Sotoku Elementary School, Noshiro 016-0151

5) Uchiotomo Elementary School, Omagari 014-0073

Abstract: To study the growth process of snowflakes, the composition factors (the number, shape and diameter of component snow crystals) were observed using a separation method of snowflakes.

For a given number of component crystals, the larger the average diameter of the crystals, the larger the diameter of the snowflakes is. The diameter of snowflakes can be expressed as a power of the number of crystals with the average diameter of crystals as a parameter.

When several crystals make a snowflake, its external form is planar, whereas with more than about ten crystals it nears a spherical form. It was confirmed that dendritic type crystals make larger snowflakes than radiating type crystals for the same number of crystals, because the average diameter of the former crystals is larger than the latter.

(2001年4月22日受付, 2001年6月20日改稿受付, 2001年11月6日再改稿受付, 2001年12月21日受理, 討論期限2002年7月15日)