

砲弾集合結晶から成る雪片の特徴

梶 川 正 弘*・佐 藤 昇**・遊 馬 芳 雄***・菊 地 勝 弘*

要 旨

砲弾集合結晶の雪片形成過程を探る目的で、北極域の地上観測で得られた顕微鏡写真を解析した。その結果、砲弾集合結晶 2～5 個が付着し、雪片を形成することが確認された。砲弾集合 2 個の付着様式については、樹枝状結晶全般の場合と同様に、小結晶が大結晶の中心と端の中間域に付着するケースが多くみられた。

砲弾集合雪片のアスペクト比はサイズと構成結晶数が増すにつれて 0.5～0.6 に近づく傾向を示した。また、構成結晶の平均粒径をパラメータとして、構成結晶数と雪片の粒径との関係式が導かれた。

1. はじめに

砲弾集合結晶は巻雲の主要な構成粒子であり、なかでもそれらが数個付着した雪片状の粒子（砲弾集合雪片と名付ける）は、粒径分布を大きく左右することから注目されている（例えば、Heymsfield *et al.*, 2002; Field and Heymsfield, 2003）。砲弾集合雪片に関連した従来までの研究をみると、巻雲の航空機観測による粒径分布の研究は多いが、雪片形成機構に関わる観測は少ない。Fujiyoshi and Kikuchi (1984) はカナダ北極域におけるレーダーと地上降雪粒子の同時観測により、砲弾集合雪片の形成条件を論じた。そのなかでレーダーエコー頂が 4 km 以上になると、砲弾集合の最大粒径は 1 mm を超えるようになり、落下距離も増加するために雪片形成が促進されると述べている。

結晶形を考慮した雪片形成モデルに基づく数値計算は、主に樹枝状結晶を想定して Maruyama and Fujiyoshi (2005) により、角柱と砲弾集合について Westbrook *et al.* (2004) により試みられている。後者の結果は、巻雲の航空機観測による粒径分布の特徴や雪片のアスペクト比の結果とよく合っている。

本論文ではフィンランド北極域のソダンキラ (67° 22'N, 26°39'E) で 2002 年と 2003 年の 1 月に観測された砲弾集合雪片に、カナダ北極域のイヌビク (68° 22'N, 133°42'W) におけるデータ (Kikuchi and Asuma, 1999) も加えて、地上観測による顕微鏡写真の解析結果から、砲弾集合雪片の形成初期の特徴を述べる。また、Heymsfield *et al.* (2002) の航空機観測結果や Westbrook *et al.* (2004) による計算結果と比較する。

砲弾集合は交差角板型結晶と同時に降ることも多いが、その雪片が目立つのは砲弾集合のみが多数の時間帯である。単砲弾を含む砲弾集合総数に対する雪片の割合は多くて 20% 前後で、地上気温は Fujiyoshi and Kikuchi (1984) の観測値 (−16～−37°C) に類似していた。

第 1 図はソダンキラで観測された砲弾集合雪片の接写真で、Fujiyoshi and Kikuchi (1984) による Photo. 1 (a) と同様のものである。また、第 2 図には雪片の構成結晶数 N が 2～4 個の粒子の偏光顕微鏡写真（昇華蒸発中の粒子が多い）と粒径などの定義を示した。

2. 砲弾集合 2 個から成る雪片の特徴

個々の砲弾集合結晶の粒径 d は第 2 図 a に示すように、その最大の大きさ（長さ）とし、2 個から成る雪片 ($N = 2$) では大粒径を d_1 、小粒径を d_2 と定義

* 秋田県立大学生物資源科学部。

** 大阪府教育センター。

*** 北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻。

—2006 年 2 月 8 日受領—

—2006 年 6 月 10 日受理—

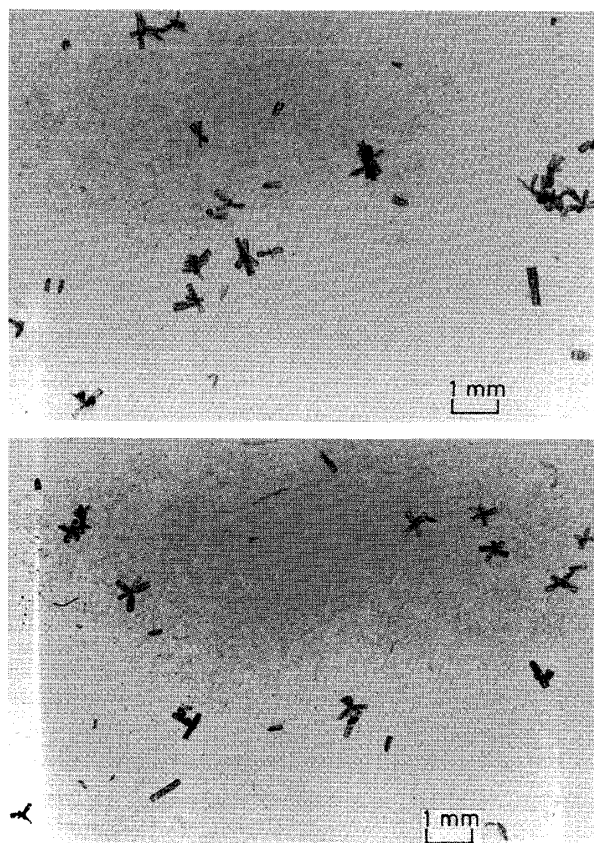


Fig. 1 Snowflakes composed of combination of bullets type snow crystals observed at Sodankylä in Finland on January 23, 2002.

した。砲弾集合2個の付着様式は、Higuchi (1960) により板状結晶の雪片に対して定義された因子 $S = 2l/(d_1 + d_2)$ で表すことができる。ここで、 l は結晶中心間の距離である。砲弾集合の中心は Kajikawa and Heymsfield (1989) と同様に、写真上における各要素砲弾の c -軸の交点とした (第2図a)。

観測された砲弾集合2個から成る雪片 ($N = 2$) を構成する各要素の粒径 d の度数分布を第3図に示す。大・小結晶の両者を合わせると、0.2~1.2 mm の範囲に大部分が含まれており、特に多いのは 0.4~0.9 mm 程度のものである。このような粒径分布は2D-Cプローブを用いた巻雲の航空機観測データ (例えば、Heymsfield and Platt, 1984; Kajikawa and Heymsfield, 1989) よりも大きい方に偏っている。第4図に砲弾集合2個から成る雪片152個について、大・小結晶の粒径比 (d_2/d_1) の度数分布を示す。この図によると、71%以上の雪片が粒径比0.75より大きい範囲に含まれていることになる。巻雲の航空機観測 (Kajikawa and Heymsfield, 1989) によると、粒

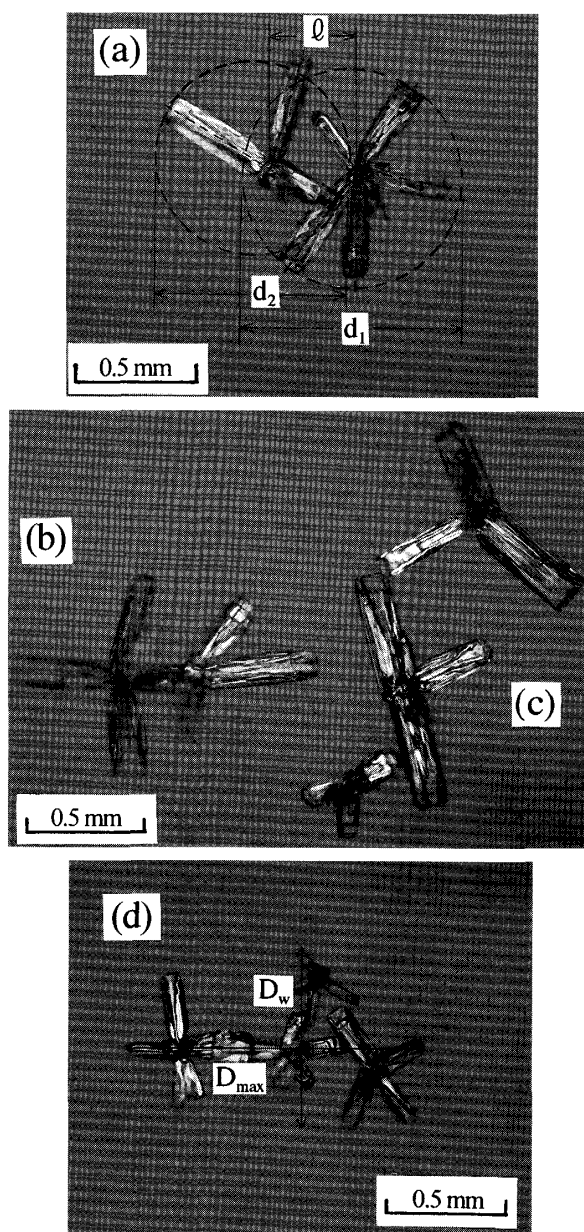


Fig. 2 Typical microphotographs of snowflakes. (a) The number N of component crystals is two. d_1 and d_2 ($< d_1$) are maximum dimension of individual crystals, and l is the distance between their centers. (b) Snowflake of $N = 2$. (c) Snowflake of $N = 3$. (d) Snowflake of $N = 4$. D_{max} and D_w are the maximum dimension of snowflakes and that in the direction perpendicular to D_{max} , respectively.

径比0.75以上の範囲には砲弾集合雪片の79%以上が含まれており、ここに示された地上観測の場合よりも類似した粒径どうしの付着がやや多くなっている。

第5図に付着様式因子 S の度数分布を示す ($S > 1$

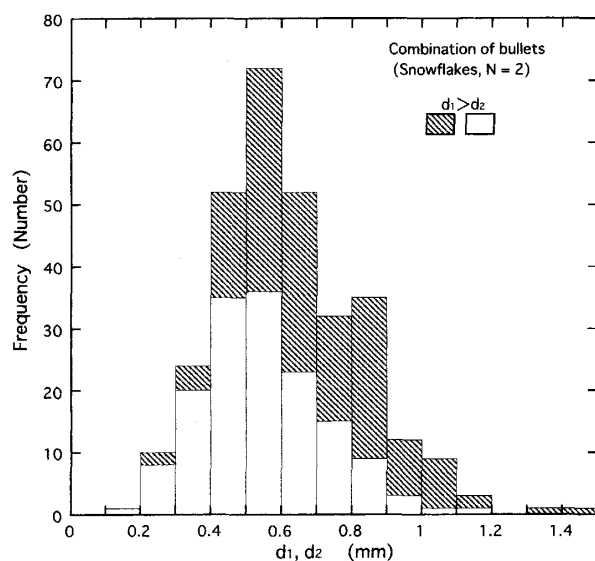


Fig. 3 Size distributions of combination of bullets composing snowflakes of $N = 2$.

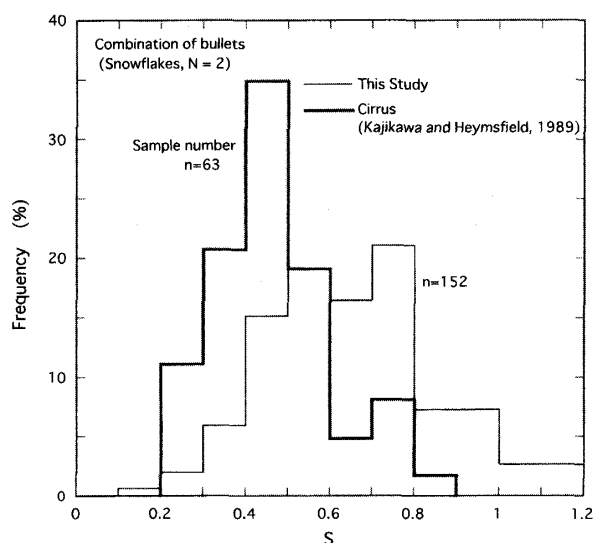


Fig. 5 Frequency distributions of $S = 2 l / (d_1 + d_2)$ (a measure of the combined state of two component crystals; Higuchi, 1960).

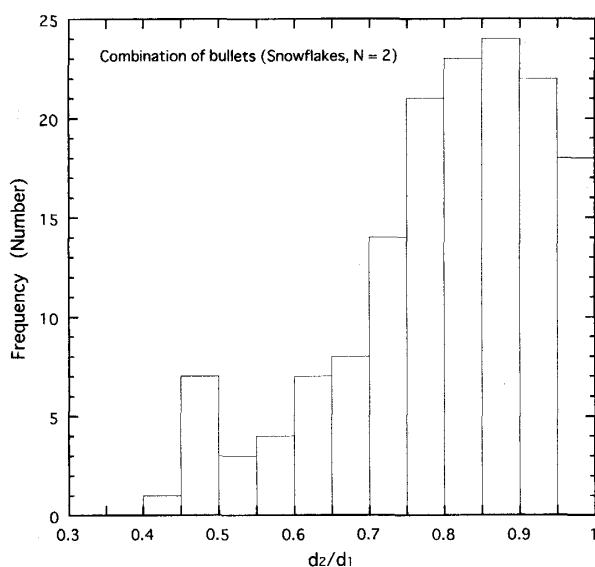


Fig. 4 Frequency distribution of size ratio d_2/d_1 of two component crystals.

になるのは、砲弾集合を形成する各要素の c -軸の長さが不均一なことによる。分布の形は整った正規分布とはいえないが $0.4 \sim 0.8$ の間で多くなり、中央値は 0.66 となる。このような分布は、同図に示された航空機観測による巻雲 (Kajikawa and Heymsfield, 1989; S のピークは $0.4 \sim 0.5$) に比較するとやや大きい方に偏っている。この差の一因として、粒径分布の違いが考えられる。巻雲中の場合には、成長途中で比較的似通った小粒径のもの ($0.4 \sim 0.5$ mm) が多く、

地上観測の場合には成長終了後と考えられ、第 3 図のように粒径分布は大きい方にずれ、分布幅も広い。

結晶の外形の特徴として、三次元的に突き出た部分が砲弾集合より多い放射樹枝は、 $0.8 \sim 0.9$ に S のピークがある (梶川ほか, 2002)。これは相対運動で衝突・付着する小結晶が大結晶の端に位置していることを示す。一方、板状結晶について Magono and Lee (1966) の分類を適用した同種から成る雪片では、類似の粒径どうし ($d_2/d_1 > 0.6$) で付着していることが多く (衝突・付着する粒子が片方の粒子の後流に引き込まれて、両者が重なるように付着する)、このときの S は 0.3 付近にピークがある (Kajikawa, 1985)。これに対して、異種から成る雪片 ($d_2/d_1 < 0.6$) の場合 (Kajikawa, 1985) は S のピークは $0.6 \sim 0.7$ となり、砲弾集合に類似している。また、樹枝状結晶全体でみると、 S のピークは $0.4 \sim 0.5$ 付近になる (梶川ほか, 2002)。以上のことから、大まかにみて砲弾集合の付着様式は放射樹枝結晶と樹枝状結晶の中間的な特徴を示すと考えてよさそうである。

付着様式因子 S におけるこのような特徴は、砲弾集合の雪片形成機構として両結晶の速度差による衝突・付着を想定したとき、板状結晶や放射樹枝とは異なり、小さい方の結晶はそれほど端の方に衝突しないことを示唆している。この理由の 1 つには、砲弾集合は各要素砲弾の間に隙間が大きいいため、相対速度が増加しても大結晶周りの流れは要素砲弾の隙間を通り抜

けやすく、近づいてくる小結晶は大結晶の端の方に逃げることなく中間部に衝突・付着しやすいと考えられる。

3. 砲弾集合雪片の粒径と構成結晶の粒径および数との関係

雪片の粒径 D_f は Kororev and Isaac (2003) と同様に、写真上の最大の長さ D_{max} 、幅 D_w との平均とした (第2図の(d)). 第6図に雪片の外形の特性の1つとして、粒子のいわゆるアスペクト比 D_w/D_{max} の度数分布を示す (総数185個). この比は0.5以上の領域にほとんど含まれるが、 D_{max} が大きくなるほど第7図にみられるように、その上限と下限の線を引くと0.5~0.6に近づく傾向を示す。

Westbrook *et al.* (2004) による砲弾集合雪片の成長モデルによると、雪片の D_{max} が要素結晶の5倍 (4~5個付着した雪片に相当する) から9倍の範囲で、アスペクト比は0.65になる。また、Kororev and Isaac (2003) の航空機観測結果では、粒径0.07~1 mm の範囲でほぼ同様の数値が得られている。これらの結果は地上観測によるアスペクト比に類似している。一方、Heymsfield *et al.* (2002) の航空機観測による CPI (Cloud Particle Imager: 例えば、Lawson *et al.*, 2000) 画像の粒径の大きな砲弾集合雪片には、アスペクト比の小さい、長く連なった粒子が多くみられる。雪片の構成結晶数 N とアスペクト比の関係は第8図に示すように、 N の増加とともにアスペクト

比は小さくなる傾向もみられる。

雪片の構成結晶数 N によりその粒径 D_f がいかに変化するのかは、雪片形成過程のモデル化 (例えば、Westbrook *et al.*, 2004; Maruyama and Fujiyoshi, 2005) や巻雲中の粒径分布に関連して重要である。個々の雪片を構成している各要素結晶の平均粒径 d_c を0.2 mm 毎に区切り、それぞれの雪片粒径 D_f と N との関係を第9図に示す。ここで構成結晶数を5個までに限ったのは、地上観測でガラス上に砲弾集合粒子を受けるとき、 N の大きい雪片は露出時間を短くしても粒子の重なったものと本来の雪片との区別が難し

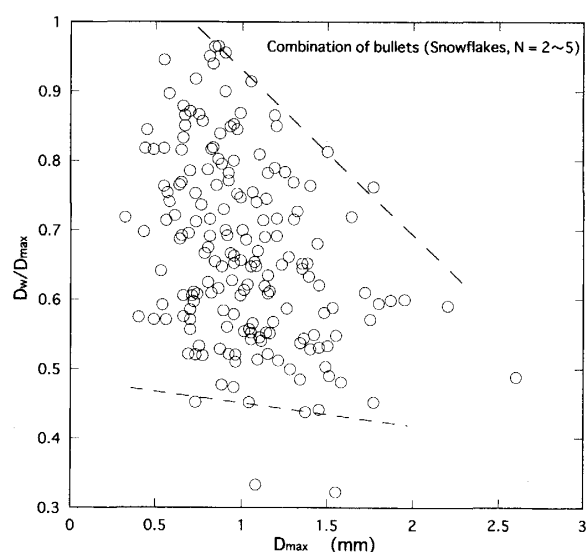


Fig. 7 Relationship between maximum dimension D_{max} and the aspect ratio D_w/D_{max} of snowflakes ($N=2\sim5$).

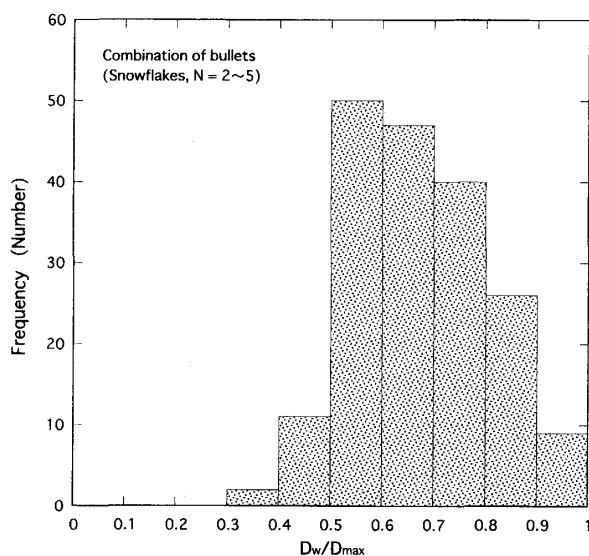


Fig. 6 Frequency distribution of aspect ratio D_w/D_{max} of snowflakes ($N=2\sim5$).

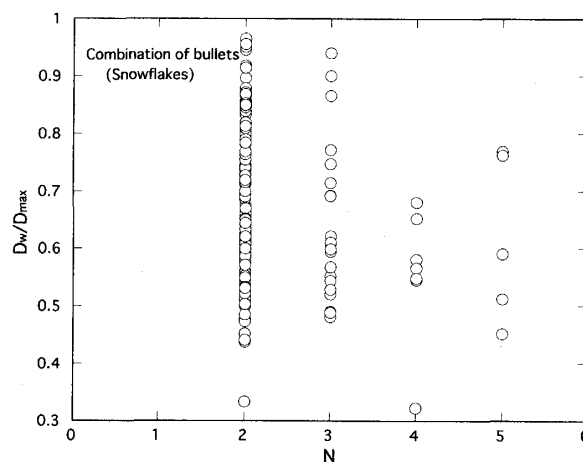


Fig. 8 Relationship between the number N of component crystals and the aspect ratio D_w/D_{max} of snowflakes ($N=2\sim5$).

くなくと考えられるためである。

第9図によると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くなっている。これは樹枝状結晶から成る雪片（小雪片の一部に放射樹枝を含む）の場合と定性的に同じ傾向である（梶川ほか，2002）。Heymsfield *et al.* (2002) による航空機観測で得られた CPI 画像で、砲弾集合雪片4個（論文中の Fig. 9 右下の7個から成る雪片を除く）

を計測したところ、ほぼ類似した位置にプロットされた（第9図の大きい印）。

第9図のなかで平均粒径 d_c の2と3の段階については、 N が5個までのデータがあるので、図に実線と点線で示したように N のべき関数 $D_f = ad_c^b$ を用いて統計的に有意な回帰式を求めると、以下ようになる（ a と b は定数で、 r^2 と n はそれぞれ決定係数とサンプル数である）。

段階2： $0.4 \text{ mm} \leq d_c < 0.6 \text{ mm}$

$$D_f = 0.433N^{0.595} \quad r^2 = 0.486, \quad n = 82$$

段階3： $0.6 \text{ mm} \leq d_c < 0.8 \text{ mm}$

$$D_f = 0.617N^{0.513} \quad r^2 = 0.578, \quad n = 63$$

砲弾集合雪片と他の結晶形から成る雪片の違いをみるために、定数 a と b の動向に着目して比較したのが第10図である。この図では平均粒径 d_{cm} として、各段階の中間値を採用した。比較のために取り上げたのは、主に樹枝状結晶から成るが小粒径の一部に放射樹枝を含む雪片で、本論文と同様の解析法による結果である（梶川ほか，2002）。この図によると、定数 a は主に構成結晶の平均粒径に依存するが、構成結晶形の違いも無視できないようである。雪片を構成する結晶の外形や落下運動の特性が関係していると考えられる。一方、定数 b は結晶の平均粒径にほとんど関係なく一定（平均値は0.58）となる傾向を示す。

構成結晶数の少ない、成長初期の雪片は平面的な外形になりやすいことが、樹枝状結晶で指摘されている（梶川ほか，2002）。これは砲弾集合にも共通してみられる特徴である（第2図(c), (d)）。そこで定数 a について両者を併せると、第10図中の回帰式のように平均粒径との関係を表すことができる。

4. まとめ

砲弾集合結晶2～5個が付着し、雪片を形成することが地上観測から確認された。構成結晶の平均粒径をパラメータとして、構成結晶数と雪片の粒径との関係式が導かれた。本解析ではガラス上に受けた降雪粒子の顕微鏡写真を利用しているため、本来の雪片のなかに粒子どうしが単に重なったものが紛れ込む可能性は否定できない。地上観測でこれを避けるためには、降雪粒子のビデオカメラなどによる落下中の雪片の直接撮影（藤吉，2005）が望ましい。

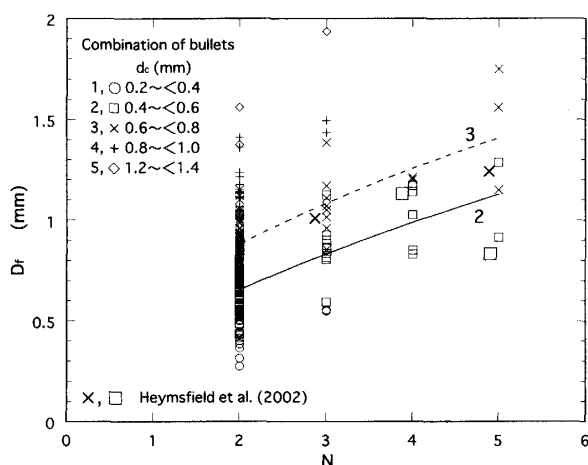


Fig. 9 Relationship between the number N of component crystals and the size D_f of snowflakes. d_c shows the average size of component crystals of individual snowflakes.

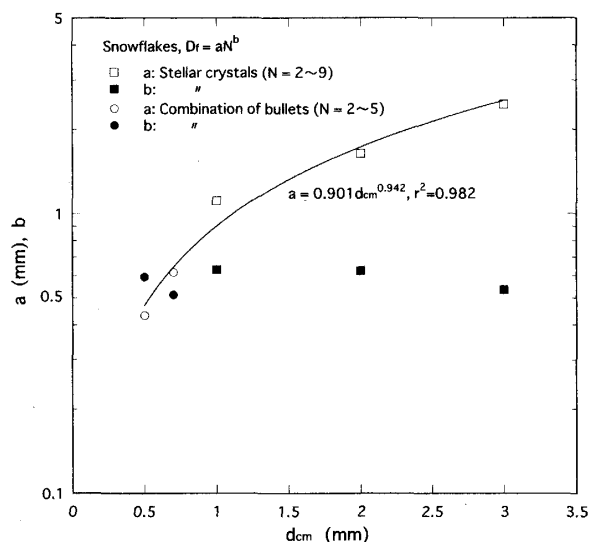


Fig. 10 Constants a and b of the experimental formula $D_f = aN^b$, as a function of average size of component crystals of individual snowflakes. Where, the mean size d_{cm} indicates the middle value of the range of d_c in Fig. 9.

謝 辞

北極域での厳冬期の観測で種々便宜を図っていただいたカナダ・ノースウエスト準州・イヌビック科学研究センターおよびフィンランド気象局北極研究センターに感謝の意を表します。本研究は文部科学省科学研究費補助金基盤研究（A）（海外調査：課題番号（13373003））の一部として行われたものである。

参 考 文 献

- Field, P. R. and A. J. Heymsfield, 2003 : Aggregation and scaling of ice crystal size distributions, *J. Atmos. Sci.*, **60**, 544-560.
- Fujiyoshi, Y. and K. Kikuchi, 1984 : On snowflakes of cold temperature types observed in the Arctic Canada (POLEX-North), *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **7**, 295-305.
- 藤吉康志（編）, 2005 : 雪片の形成と融解—雪から雨へ—, *気象研究ノート*, (207), 5-32.
- Heymsfield, A. J. and C. M. R. Platt, 1984 : A parameterization of the particle size spectrum of ice clouds in terms of the ambient temperature and the ice water content, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 846-855.
- Heymsfield, A. J., S. Lewis, A. Bansemer, J. Iaquina, L. M. Miloshevich, M. Kajikawa, C. Twohy and M. R. Poellot, 2002 : A general approach for deriving the properties of cirrus stratiform ice cloud particles, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 3-29.
- Higuchi, K., 1960 : On the coalescence between plane snow crystals, *J. Meteor.*, **17**, 239-243.
- Kajikawa, M., 1985 : Structure and falling motion of

- early snowflakes, *Annals of Glaciology*, **6**, 269-271.
- Kajikawa, M. and A. J. Heymsfield, 1989 : Aggregation of ice crystals in cirrus, *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3108-3121.
- 梶川正弘, 成田栄子, 一関景子, 工藤貞子, 佐々木るみ子, 2002 : 雪片の構成因子の観測, *雪氷*, **64**, 69-76.
- Kikuchi, K. and Y. Asuma, ed., 1999 : Studies on the water vapor, aerosols and nuclei transportation and the snow crystals of low temperature types in the Arctic regions (WANTS-Arctic), Sapporo, Hokkaido Univ., 355pp.
- Korolev, A. and G. Isaac, 2003 : Roundness and aspect ratio of particles in ice clouds, *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1795-1808.
- Lawson, R. P., A. J. Heymsfield, S. M. Aulenbach and T. L. Jensen, 1998 : Shapes, sizes and light scattering properties of ice crystals in cirrus and a persistent contrail during SUCCESS, *Geophys. Res. Lett.*, **2**, 1331-1334.
- Magono, C. and C. W. Lee, 1966 : Meteorological classification of natural snow crystals, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **2**, 321-335.
- Maruyama, K. and Y. Fujiyoshi, 2005 : Monte Carlo simulation of the evolution of snowflakes, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 1529-1544.
- Westbrook, C. D., R. C. Ball, P. R. Field and A. J. Heymsfield, 2004 : Theory of growth by differential sedimentation, with application to snowflake formation, *Phys. Rev.* **E70**, 021430.

Characteristics of the Snowflakes Composed of Combination of Bullets Type Snow Crystals

Masahiro KAJIKAWA*, Noboru SATO**,
Yoshio ASUMA*** and Katsuhiro KIKUCHI*

* *Akita Prefectural University, Shimoshinryo-Nakano, Akita, 010-0195, Japan.*

** *Science Education Institute of Osaka Prefecture, Sumiyoshi-ku, Osaka, 558-0011, Japan.*

*** *Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo, 060-0810, Japan.*

(Received 8 February 2006 ; Accepted 10 June 2006)

Abstract

To clarify the early process of snowflake growth, characteristics of the aggregation of combination of bullets type snow crystals observed in the Arctic region were investigated by examining micro-photographs of snowflakes composed of two to five crystals. The combined state of two crystals indicated that the smaller of the aggregated crystals is attached mainly in the region between the center and the periphery of the larger crystals.

An aspect ratio of snowflakes approached gradually to 0.5~0.6, when the size of snowflakes and the number of component of crystals increased. Like the case of dendritic type snow crystals, for a given number of component crystals, the larger the average size of the crystals, the larger the size of the snowflakes were. The size of snowflakes can be expressed as a power of the number of crystals with the average size of crystals as one of parameters.