

雪結晶分類小史

菊地 勝弘*・亀田 貴雄**

1. はじめに

顕微鏡写真に基いた雪結晶の分類については、これまでに Bentley and Humphreys (1931), 中谷の一般分類 (中谷 1938, 1949; Nakaya 1954), 国際雪氷委員会の実用分類 (Schaefer 1951; Mason 1957, 1971), Magono and Lee (1966) (以後 ML と略記) の気象学的分類がある。しかし、ここ数十年の極域における雪結晶に関するデータの増加, また人工雪生成を精度良く, かつ容易に可能にする装置の開発が進み, 雪結晶の低温下での成長温度領域は一気に拡張されてきた。

中谷が『雪』(1938)で, 最初の分類を示してから74年, また雪結晶研究のバイブルともいわれるハーバード大学からの“Snow Crystals - natural and artificial -” (Nakaya 1954) が出版されてからも58年, さらに Magono and Lee (1966) の分類が発表されてからも46年を経過した。これらの事実を踏まえて, 今後の雪結晶研究を更に進展させるために, これまでの観測事実を基に新たな雪結晶の分類の必要性に迫られてきているのが現状である。これらのことを踏まえて, 最近菊地ほか (2012) は新たにグローバル・スケール分類 (略してグローバル分類) の作成を試みている。しかしながら, これまでの雪結晶分類がどのような経緯で作成されたものか, また歴史の変遷やその時代の考え方などを考察したまとまった文献がないのが現状である。そこで, この解説では今後の参考にするために, これまでの雪結晶分類の時代的考証などを行ったので紹介する。

2. 雪結晶の分類の変遷

2.1 Bentley and Humphreys の分類

雪結晶の観察についての歴史的な変遷については小林 (1970) の考証があるが, いわゆる顕微鏡写真に基づいて分類したのは Bentley and Humphreys (1931) が McGraw-Hill から出版したものが最初であろう。その後, 1962年この本は Dover Publication から複製版が出されたことで, よく知られるようになった。一般に, Bentley の業績はこの著作だけのように思われがちだが, 彼は1900年初頭から単著で主としてアメリカ気象学会の Monthly Weather Review などに論文を公表していたことはあまり知られていない (Bentley 1901など)。彼らの写真集は226頁と数多くの結晶を収めてはいるが, 分類に関しては僅か1頁でしか述べていない。その分類は, 科学的なグループ分けや結晶学的な特徴というより, 雪結晶を記述するための便宜上として断わり, それらは以下のような表現で5種類に分類している。これを列記すると, A: Hexagonal column, B: Hexagonal right pyramid, C: Hexagonal plate, D: Triangular plates, E: Twelve-sided plates である。A に関してはいわゆる角柱, 鼓を含めても写真は1頁相当で, B についての写真は示されていない。C については, 特に比較的大きな板状結晶が46頁, 比較的大きな板状結晶の各コーナーから単純な角板 (いわゆる扇型) が成長したものが23頁, 同じく比較的大きく精緻な樹枝状のものが37頁, 羊歯状や羽毛状の結晶の31頁が含まれている。D は三角板状結晶 (変形の六角板) で9頁, E については十二花及び非対称板状が1頁であり, 改めて彼らの写真集は板状結晶だけの写真集とさえ思えるものである。しかし, この写真集がその後の中谷の雪結晶研究の発端の一つになったものともいわれている (東 1997)。

* Katsuhiko KIKUCHI, 北海道大学名誉教授・秋田県立大学名誉教授。

** Takao KAMEDA, 北見工業大学社会環境工学科。

© 2012 日本気象学会

2.2 中谷の一般分類

1930年北海道大学に開設された理学部に赴任した中谷宇吉郎は、当初それまで続けていた原子物理学分野の研究からスタートしたが、1932年から一転して雪の研究に進路を変えた。その辺の経緯の一部は東(1997)に見ることができる。1933年12月北海道十勝岳中腹の白銀荘での天然雪の観測が本格的に始められ、分類の足がかりをつけた論文が発表されたのは1934年12月である(Nakaya and Hasikura 1934)。1935年10月には北大に常時低温研究室が完成し、翌1936年3月初めて人工雪結晶の成長に成功した。中谷は天然雪の観測と人工雪の室内実験を継続し、毎年のように北海道大学理学部紀要・物理篇に英文で発表した。また、岩波書店から新書として『雪』(1938)を発刊し、雪結晶をI：針状から、VII：無定形までの7種に分類した。中谷の研究の集大成とされる邦文の著書は『雪の研究』(1949)で、本文161頁、附録17頁、図版319図で、それに使用された写真は1,535枚であった。分類は新書とほぼ同じで、「一般分類」として、7大分類、19中分類、14小分類で、それぞれの代表的な結晶の模式図が提示された。ハーバード大学出版局から発刊された“Snow Crystals-Natural and Artificial” (Nakaya 1954) は、先の分類を拡張させ、7大分類、19中分類、33小分類とした。これがいわゆる中谷の「一般分類 (General Classification)」としてスケッチを含めて広く使用されてきたものである。これより先、1951年アメリカ気象学会が発行した『Compendium of Meteorology (気象学綱要)』 (American Meteorological Society 1951) は、1,334頁にわたる当時の気象学の分野ごとにトピックスをまとめた大冊で、Cloud Physics (雲物理学) の用語が世に出るきっかけになった。シカゴ大学教授の H. R. Byers が担当した雲物理学分野の中で Nakaya (1951) は“The Formation of Ice Crystals” (1951) の題目で発表し、“Snow Crystals-Natural and Artificial” (1954) のもとになったものである。このことが、中谷の分類を世界的にしたものといえよう。

中谷の分類は観測地が北海道中央部の十勝岳中腹の吹上温泉や旭岳山麓の勇駒別温泉などに限定されていることから、結晶形の大部分は柱状および板状結晶であることも事実である。ただ東大理学部物理学科当時の仲間である中田金市(菊地 2001b) が厳冬期のサハリン(旧南樺太)で撮影した特異な形の雪(中谷(1949)の写真 No.817; Nakaya (1954) の写真 No.

817) は、昨今の低温型雪結晶といわれたものと類似のものと思われる結晶が掲載されている。

2.3 雪結晶の実用分類

Nakaya (1954) より先の1949年夏、カナダで開かれた「雪結晶国際分類特別委員会」では、地元カナダに、アメリカ、スイスなど、日本からは中谷が出席して副委員長を務めたが、そこで合意が得られたのがいわゆる「実用分類 (Practical Classification)」である。その結果は先の『Compendium of Meteorology』に、当時 General Electric Research Laboratory でレプリカ液を考案し、後にニューヨーク州立大学大気科学研究センター教授となった V. J. Schaefer (1951) が最初にその時の分類図を引用している。今日では広く Mason (1957, 1971) に見ることができるものである。この分類は粒子のタイプ (F) を Code 番号 1 : Plates, 2 : Stellar crystals, 3 : Columns, 4 : Needles, 5 : Spatial dendrites, 6 : Capped columns, 7 : Irregular particles, 8 : Graupel (Soft hail), 9 : Ice pellets (アメリカでは Sleet), 0 : Hail の10種とし、更に付加的特徴として m : Broken, r : Rimed, f : Flake, w : Wet の4種、それに粒子のサイズ (D) を、a : 0-0.49, b : 0.5-0.99, c : 1.0-1.99, d : 2.0-3.99, e : 4.0mm or larger の5種としたものである。具体的な使用方法としては、例えば、Stellar crystals (樹枝状)、Flake and Wet (雪片で濡れ気味) で Large (大きい) である結晶なら、F2fwDd のように表すことができる概略的な分類であって、実際の研究目的の観測では殆ど使われていないのが現状である。

2.4 孫野・李の気象学的分類

1955年北海道大学理学部地球物理学科に気象学講座が開設され、雨滴の落下状態や雪片の落下速度や併合などの論文を次々と発表していた孫野長治が横浜国立大学教授から赴任した。孫野は北大理学部物理学科学生ときは中谷の人工雪実験では針状結晶の成長を担当した。中谷の『雪の研究』(1949)の付録第2編には人工雪の写真それぞれに番号が打っており、その写真が誰によって撮られたものかが分かるように学生の名前の頭文字で記されている。例えば、最初に人工雪の成長に成功した佐藤磯之介(佐)(菊地 2001a, 2004) や、関戸弥太郎(関)、孫野長治(孫)といった具合である。ちなみに孫野が作った人工雪は6個が採用されている。

卒業後、孫野は一時理学部の助手を務めたが、間も

なく応召し、当時の満州（現中国東北部）を転戦した。1943年、中谷が主任研究員を務めた海軍主導の軍事研究だった「山頂に於ける実物飛行機による着氷の研究」（菊地 2006, 2007a, b; 菊地ほか 2006）は北海道ニセコ山頂で行われたが、それに参加できずに悔しかった。孫野は、その後札幌に異動になり、1944年の北海道根室市郊外の陸軍主導の軍事研究「千島、北海道の霧の研究」（菊地 2008）には念願かなって参加することができ、大型気球に搭乗して海霧の物理的性質の研究にはこれも主任研究員だった中谷の片腕として大いに貢献した。戦後、孫野は北大に助教授として復帰し、間もなく、横浜国立大学教授になった。1955年、その孫野が北大の気象学講座に戻ることで、中谷はこれまでの雪の研究を含め、気象学的な研究分野の全てを孫野に移し、氷の物性物理へと軸足を移していった。1957年地球物理学科に大学院が設置されると、孫野は札幌市郊外の手稲山頂（1024m）脇に、北大雲物理観測所を作り、中谷ダイヤグラムの天然雪への適応についての研究を開始した。山頂から8合目、5合目、3合目、山麓の5地点で雪結晶のレプリカ、温度・湿度を観測し、その内、山頂、5合目、山麓では顕微鏡観測も行われた。この観測は孫野をリーダーとして、黒岩大助、小林禎作、樋口敬二、若浜五郎らの他、気象学講座の大学院生であった著者の一人である菊地を含め、多くの学部学生も参加した（Magono *et al.* 1959）。

しかし、1000mの高度差だけで期待できる雲内の温度差は精々6°Cであり、多様な雪結晶の温度依存性を十分把握できなかったが、この一連の観測を通して雲層内の雪結晶の時間的な変動を明らかにすることができた（Magono *et al.* 1959; Magono 1960）。その後観測は石狩平野に展開され、結晶の水平分布へと引き継がれた。雪の結晶形と気温との間にそれほどの相関がないことに疑問を感じた孫野は新たに上空の雪結晶を捕捉できる雪結晶ゾンデ（Magono and Tazawa 1966）を開発した。この雪結晶ゾンデは35mm長尺フィルムを使い、気球の上昇中に気圧差によってしみでるレプリカ液でフィルム面上に落下した雪結晶を模るといものである。ラジオゾンデと並行飛揚した二つのゾンデは上空500hPaで気球と切り離され、パラシュートで地上に落下させるのである。山間部で発見されたゾンデは添付されてある手紙によって研究室に送り届けられることになる。この実験での回収率は約40%で、その回収率の高さと住民の協力で感謝したも

のである。その結果、幅広い温度分布と雪の結晶形との関係を得ることができた。毎冬継続されたこれらの観測で得られた雪結晶の顕微鏡写真は膨大な数となり、それをもとに Magono and Lee (1966) が分類を行い、「気象学的分類 (Meteorological Classification)」として8大分類、31中分類、81小分類にした。特に、中谷の分類との大きな違いはC1:単なる角柱の細分化と、P2:変遷六花、P6:立体型などがあげられる。変遷六花はP2c:角板付樹枝、P2f:扇付角板のように、中谷ダイヤグラム (Nakaya 1954) の樹枝の温度領域で成長を始めてから角板の温度領域へ、角板の温度領域から扇の温度領域へと、正にダイヤグラムが「雪は天から送られた手紙である」ことを証明していることを物語っていた。また、MLが分類を行っている最中に Shimizu (1963) がアメリカの南極バード基地で軸比が50にもおよぶ細長い無垢の角柱結晶を発見し、MLの分類では唯一極域の結晶としてN1e:針状角柱として分類に入れられた。

しかし前述のように、中谷やMLの分類は、その大部分が主として北海道という中緯地域の地域限定の観測に基づいたものであることは否めない。一方、北極域の雪結晶としては、シベリアでの観測をもとに、Заморский (ザモルスキイ) がその著書『Атмосферный Лед (大気中の氷)』(1955)で、また、Клинов (クリノフ) は『Вода в Атмосфере при Низких Температурах (氷点下における大気中の水)』(1960)の中で、-30°C以下の低温下で見られる数多くの結晶を紹介しているが、それらを統一的に分類という形ではまとめていない。また、南極域では1968年の菊地による昭和基地越冬時の集中的な雪結晶観測のような具体例は報告されていない。最近では、Bailey and Hallett (2004) が-20°C~-70°Cで成長する氷晶の成長速度と晶癖を自他のデータを含む多くの観測データを引用して比較検討をし、更に温度、氷飽和蒸気圧の実験データと観測データから氷晶のHabit Diagramの確証を得るための研究を精力的に行っているが (Bailey and Hallett 2009)、低温領域の結晶形を含めた分類などは行っていない。一方、古くからアメリカを始めとして低温領域での航空機観測やアラスカでのIce Fogなどの観測もあるが、統一的な分類を試みたものは無く、最近発刊された雪結晶の啓蒙書 (Libbrecht 2006) でもMLの気象学的分類を引用しているのが現状である。

3. 新しい雪結晶の分類, グローバル分類の提唱

以上のことから, 菊地ほか (2012) は中緯度域での雪結晶の観測結果に両極域での観測結果を加え, また樋口 (2007) による中谷の一般分類の扱い方に対する指摘もあって, 新たに分類に対する大幅な見直し, 検討を加えて雪結晶のグローバル・スケール分類 (略してグローバル分類) の提唱を試みている. 詳細は菊地ほか (2012) に譲るが, この分類では雪結晶の形状に主として着目し, 雪結晶を新たに 8 大分類, 39 中分類, 121 小分類に分けた. この分類は, 菊地・梶川 (2011) でも 1600 枚におよぶ雪結晶のカラー写真とともに紹介されている.

また, この分類表作成のための検討は, 「雪結晶の新しい分類表を作る会」(樋口敬二会長, 菊地勝弘副会長, 山下 晃副会長, 亀田貴雄幹事長, 他一般会員 14 名) で議論が実施され, その成果を日本雪氷学会全国大会時に開催された企画セッション (樋口・亀田 2010, 2011) と一般口頭発表 (菊地ほか 2010, 2011) で報告し, その後日本気象学会全国大会および北海道支部会でも同様の発表を実施した. なお, 「雪結晶の新しい分類表を作る会」の実際の議論は, 大分類ごとの原案とそれの修正提案という形でメールを使って議論を進め, 国立極地研究所での年 1~2 回の会議で検討を深めた. 議論に関わるメールは 2009 年 10 月から 2011 年 9 月までの約 2 年間で合計 418 通になった.

参 考 文 献

- American Meteorological Society, 1951: Compendium of Meteorology. Waverly Press. Inc., 1334pp.
- Bailey, M. and J. Hallett, 2004: Growth rates and habits of ice crystals between -20° and -70°C . *J. Atmos. Sci.*, **61**, 514-544.
- Bailey, M. P. and J. Hallett, 2009: A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: Confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2888-2899.
- Bentley, W. A., 1901: Twenty years' study of snow crystals. *Mon. Wea. Rev.*, **29**, 212-214.
- Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931: *Snow Crystals*. McGraw-Hill Book Co., 226pp.
- 東 晃, 1997: 雪と氷の科学者 中谷吉宇郎. 北海道大学図書刊行会, 249pp.
- 樋口敬二, 2007: 「側面結晶」と「交差角板」—雪の結晶分類表が二種類ある不思議—. *雪氷*, **69**, 398-402.
- 樋口敬二, 亀田貴雄, 2010: 企画セッション「雪結晶をめぐる最近の話題」. 雪氷研究大会 (2010・仙台) 講演要旨集, 20.
- 樋口敬二, 亀田貴雄, 2011: 企画セッション「雪結晶をめぐる最近の話題—孫野・李による雪結晶分類の45年目の改訂—」. 雪氷研究大会 (2011・長岡) 講演要旨集, 14.
- 菊地勝弘, 2001a: 人工雪を作った二人の S 君. *雪氷*, **63**, 397-401.
- 菊地勝弘, 2001b: U. Nakaya の Snow Crystals (1954) にてくる K. Nakata. *雪氷*, **63**, 518-523.
- 菊地勝弘, 2004: 中谷先生と日本式ローマ字. *雪氷*, **66**, 715-718.
- 菊地勝弘, 2006: ニセコ山頂着氷観測所. *天気*, **53**, 951-957.
- 菊地勝弘, 2007a: 二つの山頂観測所と二人の指導者. *天気*, **54**, 475-480.
- 菊地勝弘, 2007b: ニセコ着氷観測所実験機に関するその後の疑問. *雪氷*, **69**, 659-662.
- 菊地勝弘, 2008: 雲と霧と雨の世界. 成山堂書店, 204pp.
- 菊地勝弘, 梶川正弘, 2011: 雪の結晶図鑑. 北海道新聞社, 191pp.
- 菊地勝弘, 神田健三, 山崎敏晴, 2006: ニセコ山頂着氷観測所の実験機の検証. *雪氷*, **68**, 441-448.
- 菊地勝弘, 亀田貴雄, 樋口敬二, 山下 晃, 雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー, 2010: 中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶分類の提案. 雪氷研究大会 (2010・仙台) 講演要旨集, 14.
- 菊地勝弘, 亀田貴雄, 樋口敬二, 山下 晃, 雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー, 2011: 中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶分類 (グローバル分類) の提案 (2). 雪氷研究大会 (2011・長岡) 講演要旨集, 100.
- 菊地勝弘, 亀田貴雄, 樋口敬二, 山下 晃, 雪結晶の新しい分類表を作る会メンバー, 2012: 中緯度と極域での観測に基づいた新しい雪結晶の分類—グローバル分類—. *雪氷*, **74**, 印刷中.
- 小林禎作, 1970: 雪の結晶. 講談社, 304pp. 写真版 16pp.
- Libbrecht, K., 2006: *Snowflake* (スノーフレイク). 山と溪谷社, 111pp.
- Magono, C., 1960: Structure of snowfall revealed by geographic distribution of snow crystals. *Physics of Precipitation*, American Geophysical Union, 142-151.
- Magono, C. and colleagues, 1959: Preliminary investigation on the growth of natural snow crystals by the use of observation points distributed vertically. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII*, **1**, 195-211.
- Magono, C. and C. W. Lee, 1966: Meteorological classifi-

- cation of natural snow crystals. J. Fac. Sci., Hokkaido Univ., Ser. VII, 2, 321-335 (with Plates 27).
- Magono, C. and S. Tazawa, 1966: Design of "Snow Crystal Sondes". J. Atmos. Sci., 23, 618-625.
- Mason, B. J., 1957: The Physics of Clouds. Clarendon Press. 481pp.
- Mason, B. J., 1971: The Physics of Clouds (Second Edition). Clarendon Press. 671pp.
- 中谷宇吉郎, 1938 : 雪. 岩波書店, 161pp.
- 中谷宇吉郎, 1949 : 雪の研究. 岩波書店, 161pp. 付録17 pp. 図版319pp.
- Nakaya, U., 1951: The formation of ice crystals. Compendium of Meteorology, Waverly Press. Inc., 207-220.
- Nakaya, U., 1954: Snow Crystals—Natural and Artificial. Harvard Univ. Press, 510pp.
- Nakaya, U. and K. Hasikura, 1934: Physical investigations on snow. Part II, Classification and explanation of snow crystals observed in the winter of 1933-34 at Mt. Tokati and at Sapporo. J. Fac. Sc., Hokkaido Univ., Ser. II, 1, 163-190.
- Schaefer, V. J., 1951: Snow and its relationship to experimental meteorology. Compendium of Meteorology, Waverly Press. Inc., 221-234.
- Shimizu, H., 1963: "Long Prism" crystals observed in the precipitation in Antarctica. J. Meteor. Soc. Japan, 41, 305-307.
- Заморский, А. Д., 1955: Атмосферный Лед. Издательство Академии Наук СССР, 200pp.
- Клинов, Ф. Я., 1960: Вода в Атмосфере при Низких Температурах. Издательство Академии Наук СССР, 170pp.
-