

## 2010年秋季極域・寒冷域研究連絡会の報告

日本気象学会2010年度秋季大会(京都)1日目(10月27日)のセッション終了後に、極域・寒冷域研究連絡会が大会D会場(京都テルサ 第1会議室)にて行われた。出席者は約50名であった。今回の極域・寒冷域研究連絡会は、「雪を考えるー降雪と積雪のフィールドワーカー」と題し、積雪と降雪に関する観測的研究を取り上げ、雪氷圏で観測や活動をされている方々に講演をしていただいた。

まず初めに、2010年春に北極圏単独歩行から戻られた荻田泰永氏から、北極海の海水・環境に関する報告及び今後の活動の中での研究協力についてお話をいただいた。次に、モンゴルやシベリアで数年間に亘って積雪の観測を続けている飯島慈裕氏から、北極圏規模の気候変動に関連付けたお話をいただいた。最後に、菊地勝弘氏には、降雪の観測、特に雪結晶の写真を使ってのご講演をしていただいた。降雪の研究としては、中谷宇吉郎先生から始まり、Magono and Lee (1966)に発展した雪(結晶)の分類が世界的に知られている。菊地氏を含めたグループでは、これまで蓄積された北極域や南極域のデータを含めて、雪の分類の更新を目指した活動を進めており、その成果について紹介していただいた。

降雪は、氷晶生成からそれが成長して地表に落ちるまでのせいぜい数時間程度の現象だが、その降雪から作り出された積雪は、数か月に亘り地表に維持され、時には季節や年を越えた現象にまで議論が及ぶ。別々に議論されることが多い両者を見比べ、また、これまでの観測事実をもう一度見て、新しい考え方や課題を生み出す機会が提供できたのであれば幸いである。

以下に、各講演者より寄せられた講演要旨を紹介する。

代表：山崎孝治(北海道大学地球環境科学研究院)  
世話人：

平沢尚彦(国立極地研究所)

中村 尚(東京大学大学院理学系研究科)  
浮田甚郎(新潟大学自然科学系理学部)  
高田久美子(地球環境フロンティア研究センター)  
阿部彩子(東京大学気候システム研究センター)  
佐藤 薫(東京大学大学院理学系研究科)  
本田明治(海洋研究開発機構地球環境変動領域)  
齋藤冬樹(海洋研究開発機構地球環境変動領域)  
猪上 淳(海洋研究開発機構地球環境変動領域)  
高谷康太郎(海洋研究開発機構地球環境変動領域)  
[http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl\\_index](http://polaris.nipr.ac.jp/~pras/coolnet/cl_index)

話題：

「雪を考えるー降雪と積雪のフィールドワーカー」

## 1. 「北極圏単独歩行から見た雪氷の変化」

荻田泰永(荻田泰永北極点事務局)

2010年カナダ北極圏において、北磁極への単独徒歩冒険行を行い、その中で可搬型の気象観測ブイによる気象調査を行いました。4月22日に北緯79度で降雨を観測したことなどを今回の極域・寒冷域研究連絡会で報告させていただきました。

ブイ観測は、重さ2.2kgの小型のものをキャンブ道具や食料を積んだソリに搭載し、徒歩による移動のルート上の気温、気圧、位置データをアルゴス衛星に送信するものです。データは3時間ごとに送信され、カナダ北極圏の村レゾリュートから北磁極までの約600kmの行程を37日間かけて移動しました。

機器が正常に作動するのか?データが確実に送信されるのか?など実験的な意味合いもありましたが、故障することもなく北磁極まで共に行くことができました。

私は2000年よりカナダ北極圏を中心に徒歩による冒険行を実施してきましたが、この10年間の北極圏の変化を体感として得てきました。

また、現地に住むイヌイットとの交流の中で彼らがこれまで使用してきた海上上の狩猟ルートが近年の海水減少で使えなくなっていること、ホッキョクグマの生息域の変化なども見聞きしてきました。

我々のような海氷上を徒歩で数百 km, 数千 km にわたって移動し続ける冒険者は、通常の観測では得られない手法で観測結果が得られるのではないだろうかと考えています。

また、一般人と研究者の間に立つ我々冒険者の役割とは、北極の変化の現状を広く世間に知らしめ、地球環境についてさらに理解を深めてもらうための一助となることではないだろうかと考えています。

人の立ち入れない場所に出向き、現地でしかとることのできないデータを採取する。そこで見たこと知ったことを積極的に社会に持ち帰る活動を今後も続けていきたいと思っています。

## 2. 「北ユーラシアの積雪変動から見た北極圏気候変動」

飯島慈裕 (海洋研究開発機構  
地球環境変動領域)

ユーラシア大陸上の積雪変動は冬季の北半球の気候システムに大きな影響を与えている。本発表では、北東ユーラシアでの冬季の積雪変化と、それがもたらす大気へのインパクトについて、現地観測の結果を踏まえた様々な事例を紹介した。

まず、積雪被覆によるアルベド変化を示した。草原上では積雪開始から消雪までの積雪期間全体にわたりアルベドは0.6以上と高く維持されるのに対して、シベリア・ヤクーツクの北方林(タイガ)では、樹冠上のアルベドは地表面積雪の開始時期と融雪時期は0.3程度と低く、真冬時に0.4~0.6以上に高くなる変化がみられる。このアルベド変化は、樹冠の着雪の有無が効いている。

シベリアの場合、樹冠着雪期間は、ちょうど地上の積雪深が10 cm 以上に達する時期に相当する。一定の積雪があると、積雪面上の放射冷却に伴う地表面下の熱伝導による冷却が遮られることになり、シベリアでは、積雪深10 cm 以上で断熱の効果が大きく現れる関係となっている。また、大陸上では、気温と積雪内温度との大きな温度差によって雪質の変態が進み、霜の結晶が発達する「しもざらめ雪」となる。しもざらめ雪は積雪密度が小さく、高い断熱性をもつことから、この地域での積雪の断熱効果を更に高めることになる。

こうした積雪の被覆の結果、北ユーラシア上では、日射の減少、アルベドの増加、積雪断熱効果の増大といった条件が重なり、積雪面での放射冷却による気温

低下が効果的に進み、日平均気温が $-30^{\circ}\text{C}$ 以下の寒気が継続する期間となる。そして、11~2月の厳冬期中には、高度1000 m 以上に達する厚く安定な接地逆転層の発達が進む。高層気象観測地点のデータセット(Integrated Global Radiosonde Archive: IGRA)から、接地逆転層の強度指標(飯島ほか 2010)を求め、その時空間変動をみると、逆転層の発達場所は初冬季(10~11月)には積雪被覆拡大域にほぼ対応し、東シベリアから中央シベリア、モンゴルへと南へ拡大していた。一方、2~3月にかけて積雪域は広く残りながらも接地逆転層は急速に縮小し、特にシベリアの北方林帯では縮退が顕著に見られた。これらの変化は、積雪のアルベドと雪質の変化による、地表面放射冷却の変化に対応していると考えられる。

最後に、ユーラシア大陸上での接地逆転層の強化に伴う、寒気形成と中緯度への流出過程について、2009-2010年冬季の事例(飯島ほか 2010)を紹介した。10~3月の冬季中に日本に低温偏差をもたらす寒気流出は月に1, 2度の頻度で出現しており、それらの寒気流出イベント期間において、上空の大気は(1)「バレンツ海でのリッジ形成」→(2)「極域からの寒気移流と大陸上での蓄積」→(3)「大陸上では高・低気圧の波束が伝播」→(4)「寒気の南下が進む」という時間変化を示した。このとき、(2)の段階で、シベリア上での接地逆転の強度が強まり、(3)でシベリアの逆転層の攪乱から南部(モンゴル側)に逆転層の強度が強まり、寒気流出時に対応する変化を示していた。

従来、積雪変動とその大気への影響は、積雪面積変化から解析される研究事例が多いが、今後は植生分布ごとの積雪形態とアルベド変化、積雪深と雪質変化などを考慮した、積雪面放射・熱収支をより吟味する必要がある。それらの解析に基づいて、接地逆転発達に伴う寒気堆積・流出などの大気-陸面相互作用の研究の進展が望まれる。

## 3. 「極域に降る雪の結晶」

菊地勝弘 (北海道大学名誉教授・  
秋田県立大学名誉教授)

いわゆる今日的な雪の結晶の分類は中谷宇吉郎に始まるといっても過言ではない。中谷が雪の結晶の研究に触発された原因の一つに Bentley and Humphreys (1931) の“Snow Crystals”があげられるが、その写真集には結晶の多様性は認められるが、いわゆる分

類は行ってはいない。1932年の暮れ北大理学部は渡り廊下で始められた観測は、1933年には十勝岳中腹の吹上温泉へと発展し、1934年2月には当時の北海道帝国大学理学部紀要第II部（物理篇）に“Physical Investigations of Snow Crystal. Part I, Snow Crystals Observed in 1933 at Sapporo and Some Relations with Meteorological Conditions” (Nakaya and Hasikura 1934) が、続いて12月には同じ紀要に Part IIとして、“Classification and Explanation of Snow Crystals Observed in the Winter of 1933-1934 at Mt. Tokati and at Sapporo” (Nakaya and Iizima 1934) に見られるように、天然の雪の結晶の分類と気象条件の関係が論じられた。これらの経過は中谷の著名な著書である当時の岩波新書『雪』（中谷 1938）に詳しい。それによると、大分類としてI. 針状結晶, II. 角柱状結晶, III. 板状結晶, IV. 平板・角柱組合せ, V. 平板・角柱不規則組合せ, VI. 雲粒付結晶, VII. 無定形, の7種, 中分類として19種, 小分類として41種が図解されている。これらの総まとめとして、同じ岩波書店から出版された『雪の研究—結晶の形態とその生成—』（中谷 1949）がある。

このように1934年から英文で書かれた論文は1949年カナダで行われた国際雪氷委員会での国際分類に大きく寄与し、それらは10種に大別されて公表され、今日では実用分類 (Practical Classification) として知られている (Schaefer 1951; Mason 1957)。これより先、アメリカ気象学会 (1951) はこれまでの研究及び今後の気象学の展望を見据えた『Compendium of Meteorology (気象学大綱)』を編纂し、今日的な「雲物理学」(Cloud Physics) というカテゴリーを作った。この中で中谷は天然雪の観測結果と人工雪の成果を併せて“The Formation of Ice Crystals” (Nakaya 1951) の論文を発表し、それが今日の中谷の分類の基本となっている。この論文は言ってみればその後の Harvard Univ. Press から刊行された著名な『Snow Crystals—natural and artificial—』（Nakaya 1954）の概要版ともいえるもので、そこで示された分類は一般分類 (General Classification) として広く使用されてきた。

1930年、北大理学部地球物理学科気象学講座教授として赴任した孫野長治は中谷の愛弟子の一人で学生時代は中谷の人工雪の針状結晶の生成に貢献した。孫野は中谷ダイアグラムの天然への適用に関心を抱き札幌郊外手稲山頂 (1024 m) に北大雲物理観測所を作っ

た。いわゆる「天から送られた手紙」の解読である。手稲山の麓から山頂までの間に5箇所の観測点を設置しての結晶形と温度・湿度の連続観測、その後、石狩平野に展開した10箇所の観測点での同様な観測、更に新たに開発した雪結晶ゾンデとラジオゾンデの並行観測など多彩な研究を基に結晶の分類を行い、「気象学的分類 (Meteorological Classification)」として、今日まで広く使用されてきた (Magono and Lee 1966)。

しかし、1967年日本南極地域観測隊が雲物理学を気象研究観測として選択したことで $-25^{\circ}\text{C}$ 以下の温度条件で成長する多種多様な雪の結晶の報告が目立った (Kikuchi 1969, 1970)。その後、これらの結晶を求めてカナダ、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド、グリーンランド、スバルバル諸島、南極点基地へと観測が拡張された。その結果、これらの結晶の出現頻度は時として5%を超えることが明らかとなった。このように雪の結晶の分類は中谷の初期の分類から70年以上、一般分類からも56年、孫野・李の気象学的分類からも44年を経過した。今後も多くの極域での観測、また精度の高い人工雪生成装置の開発が試みられている現状を考慮すると $-25^{\circ}\text{C}$ 以下といった温度条件の今後の研究のためにも、新たな分類が必要になった。このような状況を踏まえ、2009年日本雪氷学会では「雪結晶の新しい分類表を作る会」を発足させた。その検討中の途中経過を紹介する。

一方、雪の結晶の極域での観測と共に、北極域でのレーダー観測も具体化し、1979年には極域観測計画 (北極域) (POLEX - North) の一環として、カナダ北極域イヌビクに北海道大学がXバンドレーダー、名古屋大学がミリ波レーダーを移設しての観測が始められた。その後もレーダー観測はイヌビク、タクトヤクタック、スウェーデンのキルナ、北極海のノルウェーの孤島ブジョルナヤ (英語名: Bear Island ( $74^{\circ}30'\text{N}$ ,  $19^{\circ}01'\text{E}$ )) では3年半にわたる観測が、また極地研究所ではスバルバル諸島ニイ・オルソン基地での連続観測が継続されている。

一般に極域の厳冬期の降水現象の特徴として考えられる雪の結晶は、接地逆転層下での初期氷晶を初めとする数十 $\mu\text{m}$ から100 $\mu\text{m}$ 以下の結晶を想像するが、時には先に言及した数百 $\mu\text{m}$ からmmサイズの結晶が時には数%の頻度で共存することも理解しておかなければならない。またブジョルナヤ島での鉛直ドップラーレーダーのエコー頂高度の厳冬期と暖候期との比

較では、共に7 kmを超えることもあった。今後期待される多種多様な衛星レーダーの開発・運用は極域の固体降水の更なる状況を把握する必要性に迫られるものと思われ、今後の極域・寒冷域研究連絡会の役割は更に増すものと期待される。

尚、プジョルナヤ島における北大鉛直ドップラーレーダーのデータは琉球大学理学部遊馬芳雄教授又は著者の許可が得られれば使用することが出来るので、希望者は連絡して欲しい。

### 謝 辞

講演を快く引き受けてくださった諸氏に感謝申し上げます。

### 参 考 文 献

- American Meteorological Society, 1951 : Compendium of Meteorology. Waverly Press, 1334pp.
- Bentley, W. A. and W. J. Humphreys, 1931 : Snow Crystals. McGraw-Hill, New York, 226pp.
- 飯島慈裕, 堀 正岳, 立花義裕, 2010 : 2009-10年冬季のユーラシア大陸の寒気と接地逆転層発達. 日本気象学会2010年度秋季大会講演予稿集, 159.
- Kikuchi, K., 1969 : Unknown and peculiar shapes of snow crystals observed at Syowa Station, Antarctica. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser.VII (Geophysics), 3, 99-116, 図版13pp.
- Kikuchi, K., 1970 : Peculiar shapes of solid precipitation observed at Syowa Station, Antarctica. J. Meteor. Soc. Japan, 48, 243-249.
- Magono, C. and C. W. Lee, 1966 : Meteorological classification of natural snow crystals. J. Fac. Sci. Hokkaido Univ., Ser.VII (Geophysics), 2, 321-335, 図版27pp.
- Mason, B. J., 1957 : The Physics of Clouds. Clarendon Press, 481pp.
- 中谷宇吉郎, 1938 : 雪. 岩波書店, 165pp.
- 中谷宇吉郎, 1949 : 雪の研究—結晶の形態とその生成—. 岩波書店, 161pp, 図版319pp.
- Nakaya, U., 1951 : The formation of ice crystals. In Compendium of Meteorology, 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 1933-1934 at Mt. Tokati and at Sapporo. J. Fac. Sci. Hokkaido Imp. Univ., Ser.II (Physics), 6, 163-180, 図版14pp.
- Nakaya, U. and T. Iizima, 1934 : Physical investigations on snow. Part I, Snow crystals observed in 1933 at Sapporo and some relations with meteorological conditions. J. Fac. Sci., Hokkaido Imp. Univ., Ser.II (Physics), 1, 149-162, 図版4pp.
- Schaefer, V. J., 1951 : Snow and its relationship to experimental meteorology. In Compendium of Meteorology, 221-234.