

2014年2月の二つの南岸低気圧時の降雪粒子の特徴と雪崩の多発との関係

石坂雅昭*・本吉弘岐*・中井専人*

Characteristics of Types of Snow and Constituent Snow Crystals from Two Extratropical Cyclones Passing Along the Pacific Ocean Side of the Japan Islands in February 2014 and Frequent Occurrence of Avalanches in the Kanto-Kohshin Area

Masaaki ISHIZAKA, Hiroki MOTOYOSHI, and Sento NAKAI

**Snow and Ice Research Center,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
ishi@bosai.go.jp*

Abstract

Two extratropical cyclones passing along the Pacific Ocean side of the Japan Islands around February 8 and 14, 2014, brought heavy snowfall and serious damage to the Kanto-Kohshin area. During the snowfall periods of the two cyclones, we carried out radar observation, continuous measurements of the size and fall speed of the snows, and observations of constituent snow crystals at our Falling-Snow Observatory in Nagaoka City. The observations revealed that in both cases the main snow type was an aggregate of plates, cross plates, and bullets, which grow at temperatures lower than -20°C . This differs from what we generally observe during snowfalls of the winter monsoon. The radar observations also revealed that the heights of the highest echoes were 5 km or more, which is higher than the heights, 4 km or less, observed during winter monsoon. Data analysis with a mesoscale meteorological model showed that temperature was lower than -20°C and relative humidity was higher than 90% (ice supersaturation) at high altitudes (above 5 km) and that the high humidity region expanded to lower altitudes as the cyclones approached, which satisfied the conditions for formation and maintenance of low temperature-type snow crystals. Moreover, it has been suggested that these low temperature-type snow crystals are related to the frequent occurrence of avalanches in the Kanto-Kohshin area, as evidenced by a previous article that reported similar events.

Key words : Avalanche, Radar, Snow crystal, Types of snow, Winter extratropical cyclones

1. はじめに

2014年2月8日および14日を中心として、いわゆる南岸低気圧が発達しながら日本の太平洋岸を北東進した。とりわけ後者の通過時には先の低気圧がもたらした積雪に加えて更なる降雪が関東甲信地方に記録的な積雪をもたらした。その結果、同地方の交通、生産、生活のさまざまな面で大きな被害が発生した(和泉, 2014)。その中で同地域には珍しい雪崩災

害も多発した(中村ら, 2014)。

この南岸低気圧の影響は関東甲信から数百キロ離れた新潟県下にも及び、低気圧の接近に影響された降雪が長岡市の当研究所雪氷防災研究センター(以下英語名 Snow and Ice Research Center の略称として SIRC とする)でもみられた。筆者らはこれまでの観測から低気圧時の降雪粒子には、普段の冬型時に日本海側で見られる樹枝状を中心とした雪片や霰など

* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

とは異なる種類の降雪が含まれることを経験していた。そこで今回の降雪においても、経常的に行っている降雪の粒径・落下速度の連続観測等に加えて人手による粒子の顕微鏡及びマクロ写真撮影を行った。それらによって、降雪の連続的な種類判別に加え、降雪粒子を構成する雪結晶に関する記録を残すことができた。また、同じく冬季連続的に実施されているレーダー観測から、雪結晶の生成高度などを推定する手がかりとなる情報を得ることもできた。しかも、およそ一週間という短い期間に類似した経路を通る低気圧による降雪があり、もたらされ降雪粒子に共通点があること、さらに先に述べた関東甲信地方の雪崩の多発に今回の降雪粒子の特徴が関係していると考えられることから、同地方から離れた所での観測ではあるが、比較的詳細な記録が残った今回の降雪についてここに報告する。

2. 観測概要

観測は SIRC での冬季降雪粒子観測の中で行われた。気温、降水量等の一般的な気象要素に加え、降雪粒子観測施設での連続的な粒子の粒径・落下速度観測(石坂ら, 2004)、落下後にベルトコンベヤーで運ばれた粒子の連続マクロ撮影(石坂ら, 2005)、人手による顕微鏡撮影などの粒子観測が行われ、合わせてレーダーによる観測も実施された。レーダーは

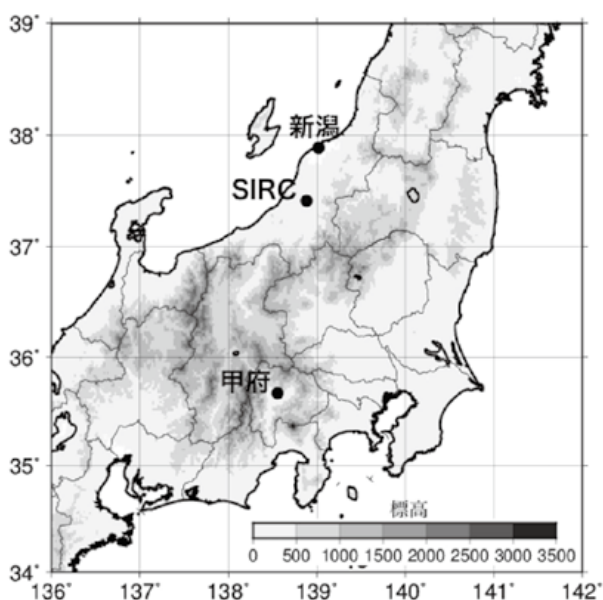


図1 新潟市(新潟地方気象台)、長岡市(SIRC)の観測点と甲府(甲府地方気象台)の位置

Fig. 1 Locations of the Snow and Ice Research Center (SIRC), Niigata local meteorological observatory, and Kofu local meteorological observatory.

SIRC が運用する X バンド(波長 3.18 cm)の偏波ドップラーレーダーである。その他の詳しい観測の内容は観測結果の記述に合わせて述べることにする。なお、参考として長岡より南西約 65 km 離れた高田(新潟県上越市)の気象庁のウィンドプロファイラーの観測にも言及する。主な観測点 SIRC 及び本論でしばしば触れる関東甲信の代表的な地点として甲府の位置(甲府地方気象台)を図1に記す。

3. 観測結果

3.1 レーダー観測と低気圧性降雪の期間について

はじめに述べたようにここでは2月8日、及び2月14日の両日を中心とした低気圧による降雪を対象としている。図2は両日の日本時間で午前9時の天気図である。8日の場合は6日台湾の北で、14日では沖縄付近でそれぞれ発生した低気圧が発達しながら日本の南岸に近づいて来た時点のものである。両ケースについて低気圧による降雪期間をどのように決めるかが問題になるが、それには以下に述べるようにレーダー観測結果に低気圧の影響と考えられる特徴が見られたため、それを利用することができた。

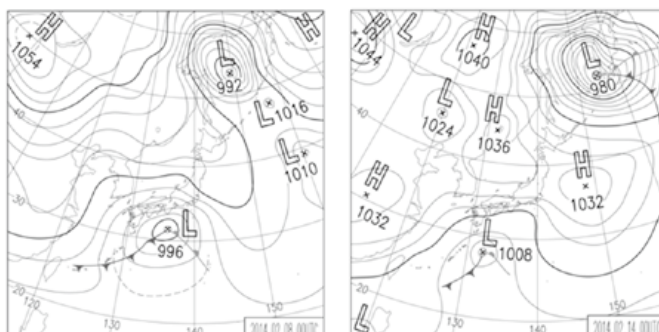


図2 2月8日及び同14日の午前9時の天気図で見られる南岸低気圧

Fig. 2 Locations of the two cyclones shown in the weather charts for 09:00 JST, Feb. 8 and 14, respectively.

両ケースとも低気圧性降雪の前には一般的な冬型の降雪があり、それが弱まり、入れ替わるように低気圧の接近に伴ってここで対象とする低気圧による降雪(降水)があり、さらに低気圧が遠ざかるにしたがって次の冬型の降雪に移行するという経過をたどった。その過程で、レーダーの反射強度、ウィンドプロファイラーの両方に特徴的な推移が見られた。それは低気圧接近前の冬型降雪時のレーダーエコー高度が3~4 km程度であったものが、低気圧

の接近にともない5 km以上の上空にまずエコーが出現し次第に下方へも広がるといった経過をたどったことである。図は載せないが、高田のウィンドプロファイラーの場合は、長岡レーダーエコーに数時間先行して、低気圧の接近にともないエコートップが5 km以上に上昇した(エコーは下層からトップまで)。

図3はSIRC上空のレーダー観測によるRHI画像である。レーダー画像は横軸0 kmの位置がSIRCでほぼ東西の上空断面であるが、真上より東側(右側)では山域が近いので大部分は山域に遮られて観測されない。西側は仰角1度以上から上空の観測である。両ケースについての3つの図は、それぞれ前の冬型が終わり低気圧の接近にしたがい新たに上空に反射強度10 dBZ以上のエコーが観測された時(T1)、そして次第に下方にもエコーがひろがり地上に達した時(降水が始まった時)、さらにエコー頂が下がり3～4 kmになった時(T2)、すなわち従来の冬型へと以降した時(T3)のレーダーエコー図である。ちなみに高田のウィンドプロファイラーも同様にこの時点よりやや遅れてトップが低下する。なお、ここでは10 dBZの領域が上空に現れた時を低気圧の影響の始まりとしたが、5 dBZ以下のエコーはこれに先立つ数時間前に現れている。また、それぞれのケースでエコーが地上に達した時間が地上における低気圧による降水(以後、低気圧性降水または降雪と呼ぶことがある)の始まりであり、その後次の冬型まで断続的に降雪が続くことになる。すなわち、両ケースとも、低気圧の影響下にあったおよその期間は図3のレーダーエコー図で両端の時点の間、その内、低気圧性降水が地上で観測される期間が中央と右端の時点間であったと考えることができる。

3.2 気象要素の変化

図4に前節で示した低気圧降雪期間のSIRCでの主な気象要素である気温と降水量、積雪深の推移を示した。それぞれの図で下矢印が示すのは、時間が早い順に図3のT1～T3の時点を表している。降雪が始まりエコー高度が下がるまでを低気圧性降雪の期間とすると、8日では気温は全期間マイナスであるが、14～15日のケースでは全体に0℃近傍で推移することが多く、時々0℃を超える時があり、期間終わりの15日の10時以降は気温がプラスになっている。関東甲信地方の大雪は甲府などでは14日

の早朝から深夜15日の早朝にかけてもたらされているのに対して、SIRCでは14日の降雪は強くなく、低気圧降雪期間の終わりに近い15日の昼にかけて降水が増えている。

3.3 降雪粒子の特徴

SIRCでは防風ネットで風の影響を少なくした空間内を落下する降雪の粒径・落下速度を一冬期連続的に記録している。除風は個々の粒子が終端落下速度に近い速度で落下するようにするためである。このようにして観測された粒子の粒径・落下速度の分布は降雪の種類の大まかな判別に役立つことがわかっている(石坂ら, 2004)。そしてさらに、各粒子の粒径と落下速度を降水量で重み付けして平均して得られる粒径と落下速度及び同座標上の位置(Center of Mass Flux distribution = CMF)は、対象とした降雪期間を代表する粒径、落下速度として降雪の性格をより定量的に表す指標となることを見いだされている(Ishizaka *et al.*, 2014)。CMFは降雪の種類と降水量寄与を反映して刻々変化するので、長い期間のCMFは平均化され降雪の種類を判別するには適しない。そこで、今回の降雪では5分間毎のCMFを用いて特徴を見ることにした。CMFの長所は、顕微鏡レベルの詳細さはないが、対象とする降雪期間の全体を人手による観測がカバーすることが難しいのに対して、それが可能である点である。ただ、降雪は気温がプラスになると融解によって粒子本来の形状から変化するので融解のない時の判別とは区別しなければならない。

そこで、8日については低気圧降雪期間全部を、14、15日についてはその中で気温がマイナスの時のCMFを選んで表示したのが図5である。図5は期間全体の気温が負の時の各5分間のCMFであるが、多くの点がLocatelli and Hobbs (1974) (以下L&H)のaggregates of unrimed assemblages of plate, side planes, bullets, and columnsの粒径・落下速度の経験式の周りに分布することがわかる。なお、side planeはここで使用した新しい分類(グローバル分類)(菊地ら, 2012; Kikuchi *et al.*, 2013)では「交差角板」に相当する。この傾向は特に14～15日のケースで明瞭であるが、8日の場合は、粒径の大きい方でやや速度が小さい方に分布する点が多くなっている。これについては後に検討する。

粒径・落下速度座標上では複数の経験曲線が近

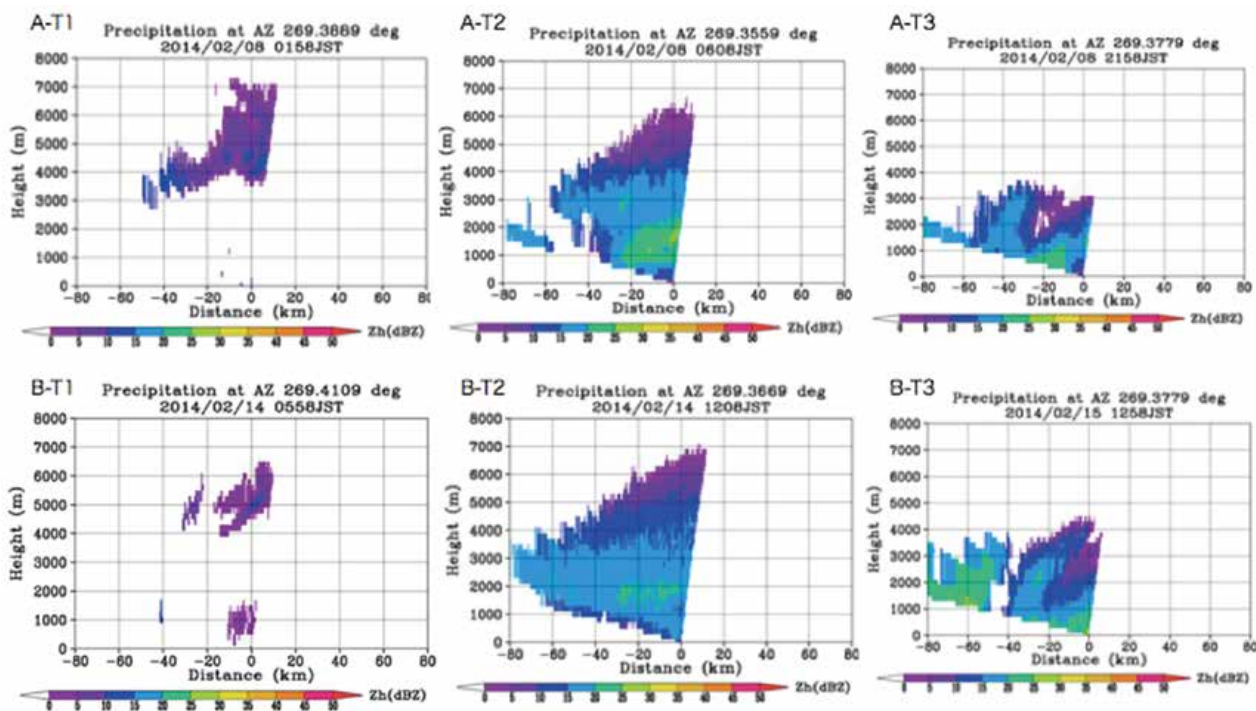


図3 SIRCにおけるレーダーRHI画像。ほぼ東西方向の上空断面。横軸原点0がレーダーの位置。Aは8日の、Bは14-15日の低気圧の場合を表し、次の記号T1は、エコー強度10 dB以上が5 km以上上空に現れた時点、T2は降水域が地上達して降水が始まった時点、T3はエコートップが従来の冬型で見られる3~4 kmまで低下した時点をそれぞれ表す。観測時刻は画像上部にJST(日本時間)で表されている。

Fig. 3 Radar echo (reflectivity) along east-west cross section centered on the SIRC (0 km on the horizontal axis). Parts A and B correspond to the cases of Feb. 8 and Feb. 14-15, respectively. T1 indicates the time at which a reflectivity of more than 10 dBZ first appeared at an altitude higher than 5 km, T2 indicates the time at which the echo reached to the ground (beginning of precipitation), and T3 indicates the time at which the top of the echo decreased to the height of 3 or 4 km, heights commonly observed during winter monsoon.

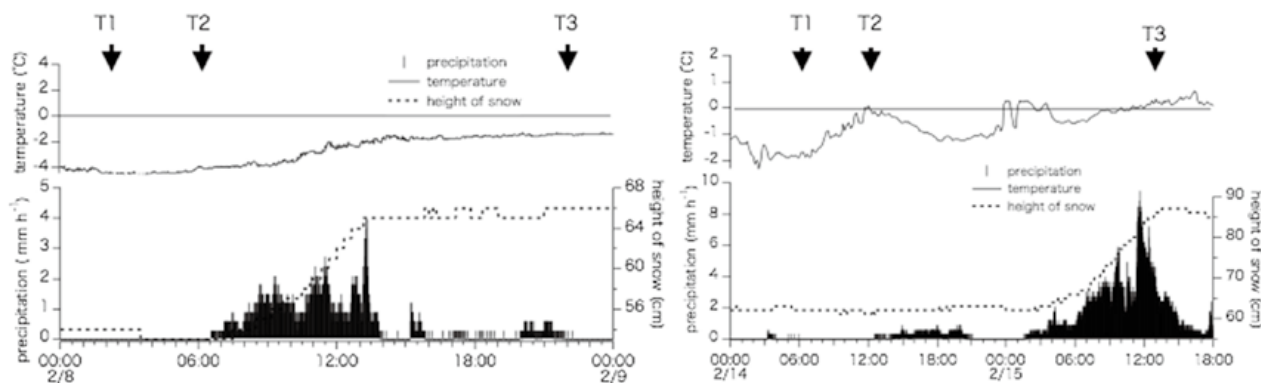


図4 2/8(左)及び2/14-15(右)のSIRCにおける気温・降水量(1分毎)・積雪深の推移。T1~T3は図3と同じ
 Fig. 4 Meteorological variables during the two cyclone periods, Feb. 8 (left) and Feb. 14-15 (right). T1-T3 are the same as those in Fig. 3.

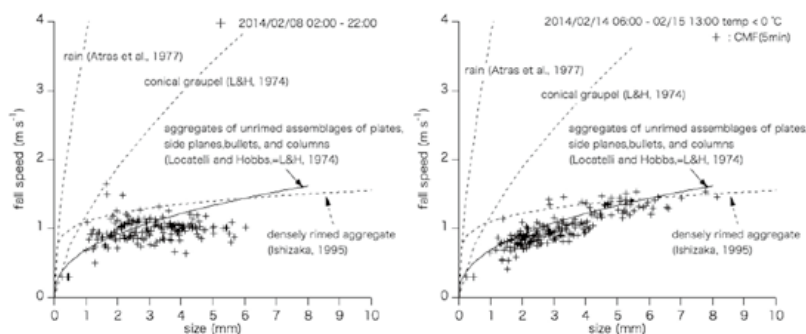


図5 低気圧の影響下と考えられる降雪期間の5分間毎のCMF。左2/8、右2/14-15の気温が零下の時
 Fig. 5 Five-minute center of mass fluxes (CMFs) for the two cyclone periods, Feb. 8 (left) and Feb. 14-15 (right). In the latter case, CMFs when air temperature was below 0 °C were selected.

傍に接近して分布する領域があるのでCMFから判別される粒子の種類は一義的には決められないが、14-15日のケースでは、14日夕方に撮影した図6の顕微鏡写真がある。これを見ると、砲弾、角柱、角板及びそれらの集合したものが雪片として降ったことがわかる。先のL&Hの経験曲線のカテゴリーに属するものである。これらの粒子群は -20°C 以下の低温域で生成される雪結晶であり(Bailey and Hallett, 2009; 村井ら, 2012), 当地方に一般的な季節風冬型時に多く見られる樹枝状結晶($-14 \sim -17^{\circ}\text{C}$)を中心とした雪片とは明瞭に異なる環境下で成長したと推定される。

次に8日のケースで見られる曲線からのずれを検討するため、両ケースについて時間帯を区切ってCMF分布を少し詳細にみることにする。8日については期間を3つに分けた(図7)。降雪期間の始まりから8日午前10時までは、先の曲線の周りに分布すること、すなわち低温型の結晶による雪片が卓越していたことがわかる。その後は曲線の下にもCMFが分布するようになり、17時以降は霰領域に近いものが現れるという変化をしている。実際この終わりの時間帯には小さい霰から霰状雪が観測されている(図8)。霰領域に近いものは、低気圧性の降雪の終わりにあたることから、次の別の降雪機構(一般の冬型)への変遷過程で次第に降雪粒子の種類が変化しつつある過程でもたらされものと考えられる。一方、図7の中央の10時からの落下速度の低下は低気圧性降雪の中での降雪粒子の変化である。それは図9に示すこの時間帯における接写写真(ベルトコンベヤー上で移動している状態での撮影なのでやや不鮮明ではあるが)でもわかるように、板状の結晶から枝が伸びた複合板状結晶が含まれていたためと考えられる。このような結晶が降雪に混じるとそれらがないものに比べ粒径を大きくし空気抵抗を増す一方密度を下げるので落下速度を減じることになる。板状結晶が下層の樹枝状成長環境で枝を成長させた可能性がある。

次に2月14, 15日の降雪については、気温が次第に 0°C に近づきそれを越える後半(15日7時頃以降)とそれ以前とに分けたCMF分布を図10に載せた。15日7時での気温はおよそ -0.5°C それから多少の変動を含みながら基本的には気温が上昇し13時には約 0.4°C に達している(図4)。図10のBの図

からわかるように、 0°C に近づくにしたがい付着力が増して雪片の粒径が大きくなったこと、また 0°C を超えたことによって一部は融解によって粒径が縮み粒径が小さくなったにもかかわらず落下速度はむしろ増したことがうかがえる。また、後半では低温型結晶であっても雲粒の付着が多くなったこと、さらに一部針状結晶など高温、高過飽和度で生成される雪が雲粒を多量に付けて降ったことが落下後の顕微鏡写真からも確認されている(図11)。

以上のように今回の2つの低気圧によってもたらされた降雪粒子は両ケースに共通して、主要なものは角柱、角板、交差角板、砲弾など低温型(-20°C 以下)の結晶を多く含む雪片であった。これについては両ケースとも新潟市で藤野によって観測された雪結晶の詳細な判別分類とも一致する(藤野・石坂, 2014)。これに8日では、上記より高温多湿の環境で生成される樹枝状結晶や板状結晶から枝が成長した複合板状結晶などが加わる期間があり、14, 15日については降雪期間の終盤(15日)には気温が 0°C 近傍になり大きな雪片の形成、雲粒の付着、針など高温多湿での結晶、さらに融解して縮んで雪片となった期間などがあったことがわかる。

4. 考察

4.1 降雪粒子の生成環境について

前節で述べたように低気圧時の主要な降雪粒子は、普通の季節風冬型で見られる $-14 \sim -17^{\circ}\text{C}$ 付近を生成温度環境とする樹枝状結晶を中心とした雪片とは異なり、より低温の環境下(-20°C 以下)で生成される結晶群であった。より低温であることはレーダーのエコー頂が通常の冬型時より高いところから、それらは高い高度の低温環境下で生成されたことが推測される。

そのことを確認するために、降雪時の上空の様子を検討する。ここでは気象庁メソ数値予報モデルMSMを3時間毎の初期値を中心に1日毎のファイルとして再構成したものとして公開されている数値気象データを使用した(<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>)。図12はSIRC上空(同緯度・経度)の湿度と気温の時間推移である。また、図4と同様の時点T1~T3を表す矢印を付けた。8日のケースでは、前日の7日の午前(00Z-03Z)では800 hPa以下の下層に高湿度の領域があり、前の冬型の名残

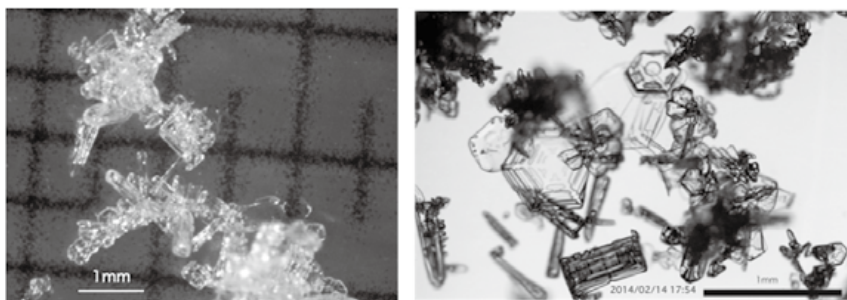


図6 SIRCで観測された雪片を構成する雪結晶の顕微鏡写真
Fig. 6 Microscopic photos of the constituent snow crystals.

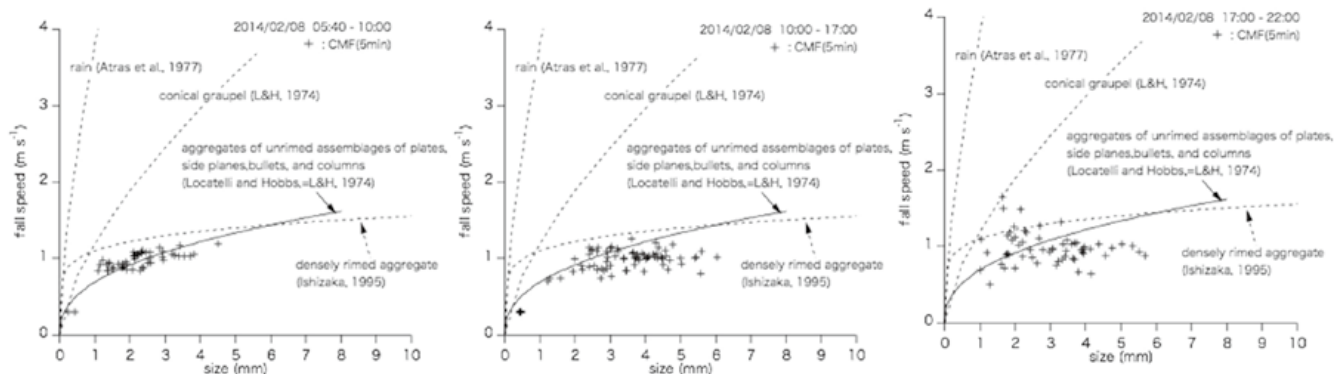


図7 2/8のケースを3つの期間に分けて示したCMFの分布. 期間はそれぞれのグラフの上段に記載
Fig. 7 Five-minute CMFs for three continuous periods of the Feb. 8 event. The periods are indicated in the upper part of each graph.



図8 2/8の18時台に観測された霰状雪
Fig. 8 Close-up photo of graupel-like snows observed at around 18:30 on Feb. 8.

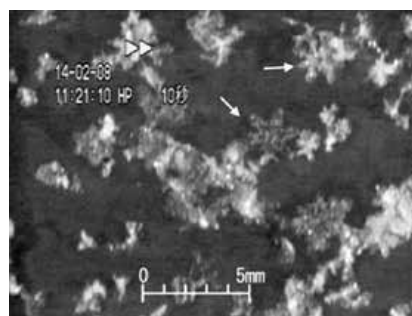


図9 2/8の11時台に観測された枝付角板状の雪結晶(矢印)
Fig. 9 Close-up photo of plates with branches type of snow (indicated with arrows) observed at around 11:20 on Feb. 8.

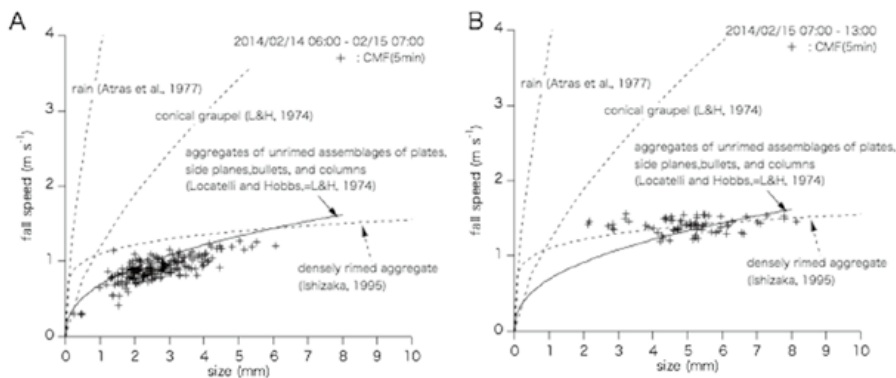


図10 2/14-15の低気圧性降雪の終盤(B)とその前までのCMF(A)
Fig. 10 Five-minute CMFs for the last stage of the Feb. 14-15 event (B) and the stage before it (A).

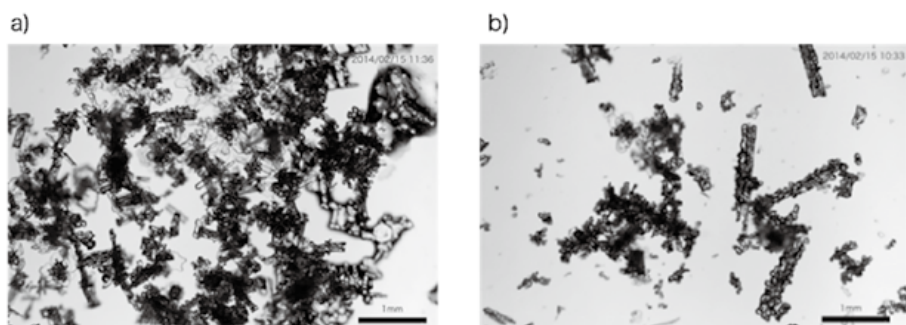


図 11 2/15の低気圧性降雪の終盤の雪結晶の顕微鏡写真. a) 雲粒付きの低温タイプの結晶. b) 雲粒付針

Fig. 11 Photomicrographs of the snows of the last stage of the Feb. 14–15 event. a) Densely rimed low-temperature type snow crystals. b) Densely rimed needles.

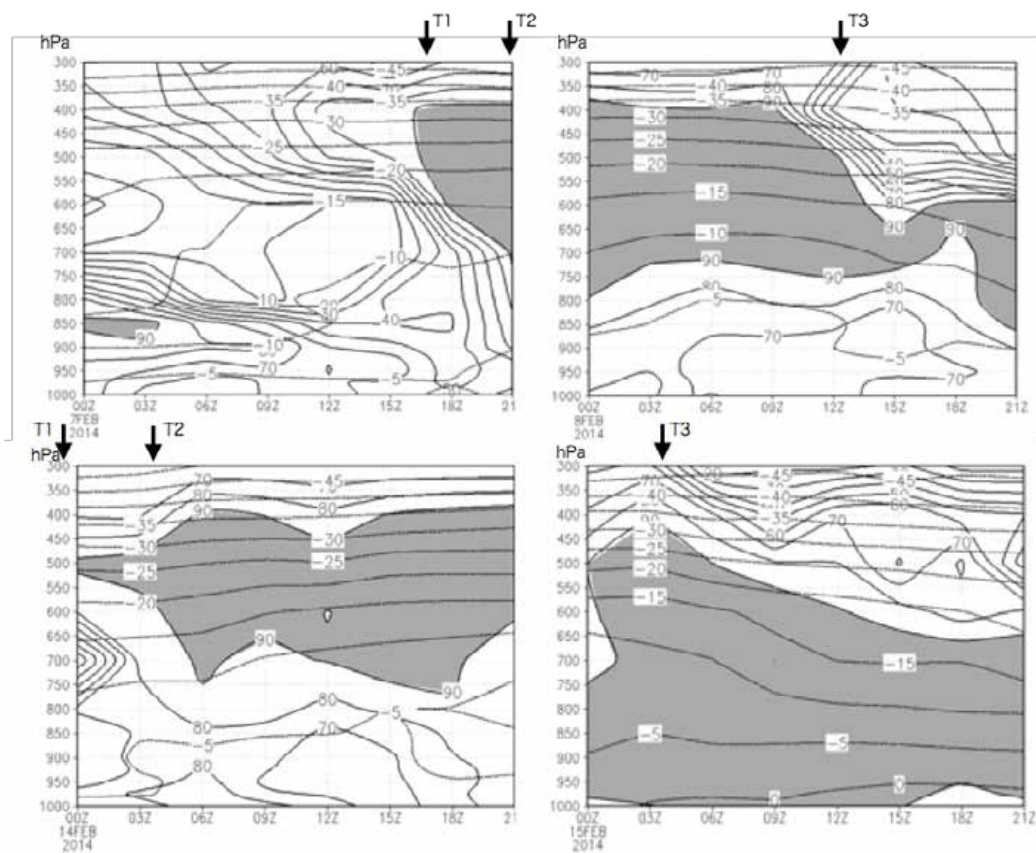


図 12 2/8(上段)と2/14(下段)両ケースのSIRC(長岡市)上空の気温(点線)と相対湿度(実線)の推移. 灰色は湿度90%以上の領域. 気象庁メソ数値予報モデルMSMの3時間初期値による再構成データによる. 矢印は図3と同様の時点を示す.

Fig. 12 Air temperature (dotted line) and the relative humidity (solid line) above SIRC estimated with the non-hydrostatic model MSM developed by JMA during the two cyclone periods, Feb. 8 (upper) and Feb. 14–15 (lower). The zones colored with gray correspond to portions with humidity higher than 90%.

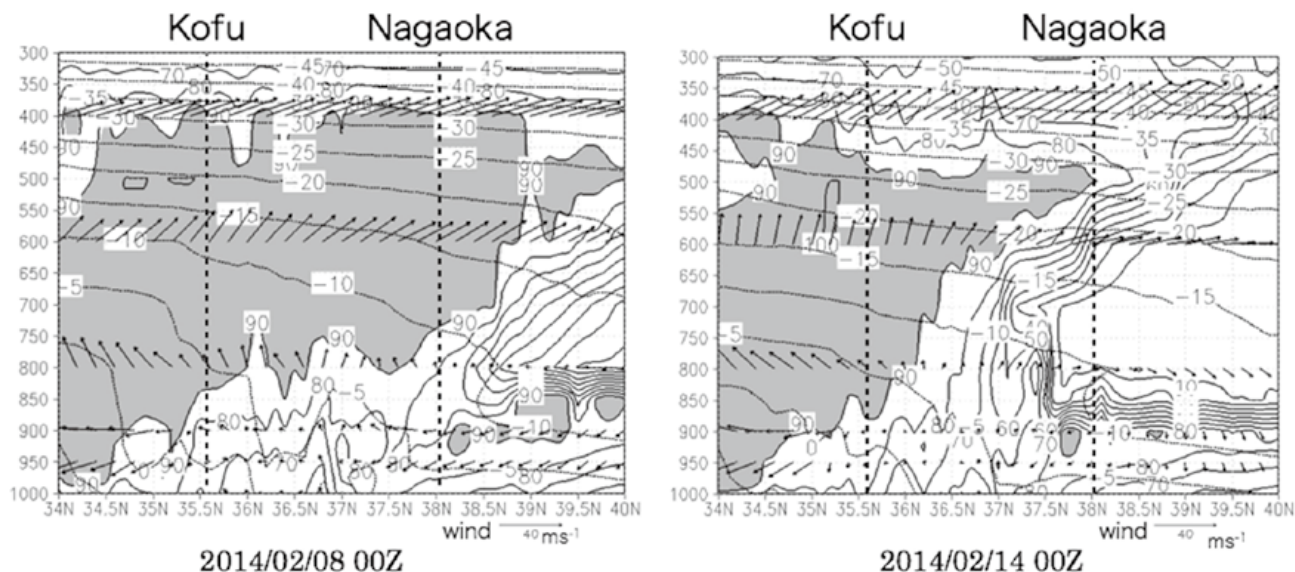


図 13 2/8 (2/8 00Z(左)と 2/14 00Z(右)の東経 138.5 度の大気断面の気温(点線)と相対湿度(実線)及び風向・風速(矢印). 灰色は湿度 90%以上の領域. 気象庁メソ数値予報モデル MSM の 3 時間初期値による再構成データによる.
Fig. 13 Air temperature (dotted line), relative humidity (solid line), and wind direction and speed (arrow) of the cross section along longitude 138.5° E from 34° N to 40° N on 00z of Feb. 8 (left) and Feb. 14 (right) estimated with the non-hydrostatic model MSM developed by JMA. The zones colored with gray correspond to humidity higher than 90%.

がみられる (Zは協定世界時 UTC). この時, その上の湿度は低い. そして, 18Z, すなわち 8日 3時少し前から上空に湿度の高い状態が出現し次第に下層まで高湿度になっていったことがわかる. 高湿度の範囲は 8日 09Z から 15Z すなわち同日 18時から 24時にかけて急速に高度を下げていった. 図 3 でレーダーエコーが高い高度で出現したのが日本時間の 2 時頃, 高度を下げたのが 22 時頃であることと対応している.

14 日については同日 00Z すなわち 9 時前にやはり上空から高湿度が広がり 15 日 03Z (12 時) から高度を下げていく. これもレーダーエコーが 14 日 6 時頃から現れ翌 15 日 13 時に高度が低くなったことに対応している. 両者とも高度は 500 hPa 以上では気温が -20°C 以下のところで高湿度(相対湿度 90% 以上, 氷過飽和)になっており, 観察された結晶群の生成場所がこれら高度の高い低温下の環境であったことが推定される. その下層の -15°C 付近もやはり湿度が高いことから, それより上空で生成された結晶もこの付近を落下すれば角柱なら鼓形へ, 角板なら各角から枝が延びた角板状樹枝が生成される可能性がある. 2/8 のケースで樹枝状結晶や複合板状結晶が低温型に混じって観測されたのは, そのよう

な経過をたどった粒子があったと考えられる. また, 2/14 の低気圧性降水期間の終盤 (2/15 00Z から), 下層も 90% 以上の高湿度になっていることは, 先に見られた雲粒付着度の増加, 針など高温・多湿域での結晶の成長などと整合的な大気環境と言える. ただ, どちらの場合も直上の環境場だけでなく, 風の影響など水平方向の移動(樋口, 1959) のことも考慮しなければならない.

そこで, 先の MSM の解析値で経度 138.5 度の本州上の大気断面の気温と相対湿度を見たのが図 13 である. 138.5 度はほぼ甲府地方気象台の経度にあたり SIRC (長岡) のやや西側である. 両地域の緯度に相当する位置を縦の点線で示した. いずれの図でも 38 度以北の日本海側では, 中層の乾いた領域に乗り上げるように湿った領域が分布し, 高い高度域では南ないし南西の風とともに相対的に温暖多湿な大気が侵入していることがわかる. 両ケースとも 00Z (午前 9 時) の図を示したが, 8 日, 甲府地方気象台の観測では 4 時前から雪が降り始め, 9 時には 10 cm の積雪となっていた. 長岡 SIRC でも 6 時頃から弱い雪が降り始めていた. 14 日では, 甲府は雪が 6 時前から降り始め, 図の 9 時には 8 cm 程度で本格的な雪はその後にもたらされる. 長岡 SIRC

では図の時刻ではまだ雪は降ってはいない。上層が湿って雪の生成が可能であるが、中層の乾いた領域で蒸発して地上にまで達しないと考えられる。その後南岸低気圧の北東進にともなって、湿った領域が次第に下層でも北上してくることになるので新潟県下でも降水がもたらされることになる(SIRCでは12時過ぎに雪となる)。いずれの場合も南岸低気圧の接近に伴い上層から、そして次第に下層に高湿度領域が広がっていくこと、したがって、SIRCより南の関東甲信地方の上空でも低温かつ高湿領域が存在していたことが推定され、SIRCと同種の低温型の雪結晶を含む降雪粒子が降る条件があったことがわかる。

4.2. 雪崩の多発と降雪粒子との関係

はじめにで述べたように今回の低気圧、特に14日から15日の降雪は関東地方に大雪をもたらし、当該地域では珍しい雪崩も多数発生した。中村ら(2014)あるいは和泉ら(2014)はこの雪崩災害を調査し、その特徴として、狭い地域でも多数の雪崩が発生したこと、サラサラの雪の表層雪崩が多かったこと、落石用の細かいネットなどもすり抜けて来ることなどの特徴を報告している。

この種のサラサラした雪による雪崩の多発については、既に四手井(1953)が1952年2月26日に福島・山形県下に多くの表層雪崩を起こした特殊な雪と関連して報告している。そこでは、雪結晶は平板、六花、鼓形、柱状等各種含まれているが、小型で厚みがあり、表面が平滑ではなはだガラス細工のように凹凸が少ないこと、サラサラとしてすぐ崩れること、断面を作ると青く見える、とあり。かつ、雪崩は山形、福島の県下で多数確認されたこと、これまで起きたことのない斜面でも発生していること、衝撃力は大きくないが粉をかぶせたようにものが埋設するなどの特徴をあげている。さらに、雪が降った総観気象場についても、紀伊半島先端付近に中心をもち東方向に温暖前線を伴う低気圧が描かれた天気図を示しつつ「冬型の西高東低型ではなく、南から発達しつつ北上してくる低気圧によるものであると言えよう」と述べている。

今回の降雪粒子の観測は関東から離れた長岡でのものであり直接の証拠とは言えないが、前節の解析で示したように関東甲信でも同種の低温型の雪結晶を主要な構成要素とする降雪をもたらす条件が整っ

ていたことがうかがわれる。そのことから、今回の雪崩の多発事例についても、雪結晶及び総観気象場の特徴が四手井の報告と符合すると考えられることから、雪崩の多発は低温型雪結晶による現象であったと推定される。

さて、低気圧性降雪による雪崩については、これまで雪崩の弱層を形成する降雪として雲粒の着かない広幅六花などが注目されてきた(秋田谷, 2000; 中村ら, 2013)。そして実際その種の雪結晶の弱層による雪崩も観測されている(中村ら, 2014)。また、8日には雲粒の付かない板状や複合板状結晶が降ったことが確認されている。中村も述べているようにサラサラの雪による雪崩と雲粒の着かない広幅六花によるものとの両方の性格の雪崩が生じたていたと考えるのが自然かもしれない。ただ、前者は四手井(1953)が指摘してからほとんど注目されてこなかっただけに、これを機会に研究されるべきものと思われる。

サラサラの雪による雪崩は、積もっては雪崩れることを繰り返す意味で点発生表層雪崩の要因の1つとなりうると考えられる。秋田谷(2000)でも、多量の新雪とともに雲粒の付かないきれいな雪は密度が小さく点発生乾雪雪崩になり易いとしているが、今回のような低温型の雪結晶はその形態からもわかるようにそれほど密度が小さいわけではなく、改めて雪結晶の種類との関係も検討する必要がある。その際、サラサラという点で安息角が重要となる可能性があるが、実際、上石ら(2014)は今回の南岸低気圧の後で同様の低気圧性降雪の安息角を測定して通常の雪より小さいことを確認している。

また、今回の雪崩はその動態からすり抜け現象を伴う雪崩(すり抜け雪崩)を連想させる。点発生表層雪崩と「すり抜け雪崩」について、北海道で多発しその要因の解明と対策が急がれていて、いくつかの研究がある。松下ら(2008)は北海道での乾雪雪崩から「すり抜け雪崩」の発生条件を降雪強度、気温、雪の結合力の指標としての硬度などの関係から解析した。また竹内(2009)が低温下の降雪時に発生する点発生表層雪崩を「スラフ」として紹介しつつ、それがすり抜け雪崩を起こすことがあることを述べ、さらに「降雪粒子の一つ一つが安息角より急なため斜面を転がり落ちていることも考えられる」と降雪粒子との関係に言及している。本州でも例えば、山口ら

(2004)の乗鞍スーパー林道で発生した雪崩の調査報告には林間で多数発生し林間をすり抜けて来たことから「積雪層は凝集力の小さなサラサラした新雪であった可能性がある」と述べている。ただ、この時は雪崩の要因として積雪層内にこしもぎらめ雪の弱層が形成されたと推定していること、二つ玉低気圧が本州を北東進したが、その際の降雪よりもその後冬型による降雪に注目している点で今回の例と必ずしも適合しないが、雪崩落ちた雪の多くに低温型の降雪粒子を含んでいた可能性は否定できない。サラサラ雪と「すり抜け雪崩」についても、降雪粒子との関係も含めてより広い観点からその要因を探る必要があると思われる。さらに今回のような特徴ある低気圧性降雪と雪崩との関連については、これまであまり注目されてこなかっただけに、要因が明確でないこれまでの雪崩の中にも今回と同様の降雪粒子に起因するものがある可能性があり、今後の研究が待たれる。

5. まとめ

二つの南岸低気圧が新潟県下にもたらした降雪の特徴について報告した。連続的な降雪粒子の観測、レーダーによる上空の観測等が整っていたこと、また関東地方の災害調査から得られた情報から共通する降雪の特徴が見られたことから、長岡における降雪粒子の観測をまとめ、雪崩の多発との関連について検討した。

今回の雪の粒径・落下速度は大きいものでは、雲粒付雪片、すなわち牡丹雪に近い。すなわち雪をマクロ撮影や顕微鏡レベルで見ない限り、降っている様子だけからは低気圧が近づいて、重い雪が降っているとしか見えない。しかし、ここで述べたように雪片を形成する結晶は、普段の冬型でもたらされる樹枝状結晶ではなく、より気温の低いところで生成される結晶群であった。すなわちそれらは西高東低の季節風の冬型よりは高度の高い低温環境下で生成したと推定された。気象モデルの解析値からもそのような環境が整っていたことを示していた。

生成場所は低温でも低気圧は南からの暖気も運ぶので、降水は往々にして雨になり易い。しかし今回は新潟の平地でも零下を下回る期間があって固体降水として観測できた。「雪は天からの手紙である」(中谷, 1938 ; 1997)と言われるごとく、固体の雪の場

合は結晶形に生成の履歴が残ったことが幸いした。しかし、地上に降ってきた結晶は生成から地上にくるまでの長い経路上の大気の影響を受けている。多くは地上に達するまで1時間以上の旅である。水平距離も上空の風速によっては100 km以上も旅することになるだろう。その中で、今回の雪は生成時の特徴を色濃く残して地上に達したように見える。関東甲信越に多量の雪をもたらした要因とともに、生成時の形を保った低温型の結晶を多く含んだ降雪粒子が降った機構の解明も、それらが雪崩の要因になる可能性があるだけに重要である。これらの課題の解明に本報告が役立てば幸いである。

謝辞

レーダー及び降雪粒子の冬季経常観測は当研究所のプロジェクト「高度降積雪情報に基づく雪氷災害軽減研究」で行われているものである。また、気象モデルについては気象庁メソ数値予報モデルMSMの3時間初期値による再構成データ(京都大学がアーカイブとして公開)を使用した。そしてそれらによる結果の作図にあたってはThe Grid Analysis and Display System (GrADS)を利用した。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 秋田谷英次(2000)：雪崩発生のメカニズム。基礎雪氷学講座3 雪崩と吹雪，古今書院，東京，51-62.
- 2) Bailey M and J. Hallett (2009) : A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: confirmation from the laboratory, AIRS , and other field studies. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 2888-2899.
- 3) 藤野丈志・石坂雅昭(2014)：2月の南岸低気圧時に新潟で見られた雪結晶。雪氷研究大会(2014・八戸)講演要旨集，212.
- 4) 樋口敬二(1959)：雪の結晶の水平分布について(序報)。天気，**6**，187-189.
- 5) 石坂雅昭・椎名 徹・中井専人・佐藤篤司・岩本勉之・村本健一郎(2004)：画像処理手法を用いた自動観測による降雪粒子の同定について その2 長岡で観測された降雪粒子と自動観測による検出手法の検証。雪氷，**66**，647-659.
- 6) 石坂雅昭(2005)：降雪取り込み型低温室を利用

- した弱層形成降雪粒子の観測. 雪氷, **69**, 481-488.
- 7) Ishizaka M., H. Motoyoshi, S. Nakai, T. Shiina, T. Kumakura, and K. Muramoto (2014): A new method for identifying the main types of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 747-762.
- 8) 和泉 薫 (2014): 2014年2月14-16日の関東甲信地方を中心とした広域雪氷災害に関する調査研究. 平成25-26年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)(特別研究促進費)研究成果報告書, 180 pp.
- 9) 和泉 薫・河島克久・伊豫部勉・松元高峰 (2014): 2014年2月中旬の大雪による雪崩災害の発生状況と特徴. 2014年2月14-16日の関東甲信地方を中心とした広域雪氷災害に関する調査研究. 平成25-26年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)(特別研究促進費)研究成果報告書, 111-118.
- 10) 上石 勲・中村一樹・安達 聖・山下克也 (2014): 2014年2月の南岸低気圧の降雪による雪崩災害と関連する大雪災害. 2014年2月14-16日の関東甲信地方を中心とした広域雪氷災害に関する調査研究. 平成25-26年度科学研究費助成事業(科学研究費補助金)(特別研究促進費)研究成果報告書, 119-1125.
- 11) 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**, 223-241.
- 12) Kikuch K., Kameda T., Higuchi K., Yamashita A., Working group members (2013): A global classification of snow crystals, ice crystals, and solid precipitation based on observations from middle latitudes to polar regions. *Atom. Res.*, **132-133**, 460-472.
- 13) 松下拓樹・松澤 勝・伊東靖彦・加治屋安彦 (2008): 斜面積雪が雪崩予予防柵面をすり抜ける現象の発生条件. 寒地土木研究所月報, 10-17.
- 14) 村井昭夫・亀田貴雄・高橋修平・皆已幸也 (2012): 対流型装置を用いた－4℃から－40℃での人工雪結晶の形態と生成条件－鏡面冷却式露点計による湿度測定に基づく結果－. 雪氷, **74**, 3-21.
- 15) 中村一樹・佐藤友徳・秋田谷英次 (2013): 表層雪崩の原因となる降雪系弱層形成時の気象の特徴. 2013年度秋季大会講演予稿集, 日本気象学会, 374.
- 16) 中村一樹・上石 勲・阿部 修 (2014): 2014年2月の低気圧の降雪による雪崩の特徴. 雪工学会誌, **30**, 106-113.
- 17) 中谷 宇吉郎 (1938): 雪, 岩波書店, 東京, 165pp.
- 18) 中谷 宇吉郎 (1994): 雪, 岩波書店, 東京, 181pp.
- 19) 四手井綱英 (1953): 表層雪崩の一特異例. 雪氷, **14**, 2-5.
- 20) 竹内政夫 (2009): すり抜け雪崩と点発生乾雪表層雪崩(スラフ). 北海道の雪氷, **28**, 29-32.
- 21) 山口 悟・西村浩一・納口恭明・佐藤篤司・和泉 薫・村上茂樹・山野井克己・竹内由香里・M. Lehning (2004): 上高地乗鞍スーパー林道で発生した雪崩(2003年1月5日)の調査報告. 雪氷, **66**, 51-57.
- (2015年9月28日原稿受付,
2015年10月16日改稿受付,
2015年10月16日原稿受理)

要 旨

2014年2月8日および14日を中心に日本に接近した南岸低気圧は関東甲信に大雪をもたらした。この時、新潟県下にも降雪があり、長岡市でレーダー、降雪粒子の粒径・落下速度、降雪を構成する雪結晶の諸観測が行われた。その結果、本低気圧による主要な降雪は、通常の季節風冬型時に多い樹枝状雪片とは異なり、 -20°C より低温下で成長する角柱、角板、交差角板、砲弾など低温型の結晶を多く含む雪片であった。レーダーのエコー頂も通常冬型時より高く5 km以上に達していた。気象モデルの解析値から、5 km以上では気温は -20°C 以下であり、高い相対湿度層(90%以上の氷過飽和)が低気圧の接近に伴い上空から下層に達し、低温型の結晶が形成維持される条件が整っていたことがわかった。これら低温型結晶は、過去の論文に類似の事例があることから、関東甲信での雪崩の多発の主要因であると推定された。

キーワード：南岸低気圧, 降雪種, 雪結晶, レーダー