

低気圧に伴う降雪システムの Ka バンド偏波レーダー観測 Ka-band polarimetric radar observation of a low-pressure snowfall system

出世 ゆかり¹⁾, 前坂 剛¹⁾, 木枝 香織¹⁾, 岩波 越¹⁾
Y. Shusse¹⁾, T. Maesaka¹⁾, K. Kieda¹⁾, K. Iwanami¹⁾

¹⁾防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

¹⁾ National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience

Abstract: Ka-band polarimetric radar observation in Tsukuba was carried out on a snowfall system associated with south-coast cyclone on 20 January 2017. Characteristics of polarimetric radar measurements related to snow crystal types and the finescale structure of the snowfall system related to snowfall formation processes were analyzed. During the snowfall period on the ground, two layers of radar echoes were observed at an altitude of less than 2.5 km and an altitude of about 3.5 km. The generating cells with horizontal and vertical scales of about 1 km were observed near echo top of the lower echo, which probably related to rapid growth of the snow crystals. Their associated fall streaks reaching the vicinity of the ground were also found. These finescale structures in the snowfall system likely contributed to the strengthening the snowfall on the ground. The radar echo of the upper layer had remarkably large Z_{DR} values of about 5 dB. Scattering calculations support that plate-like snow crystals with high density mainly constituted the upper echo. These observation results show the possibility of monitoring and early detection of snow crystals forming weak layers in accumulated snow that could lead to avalanches by Ka-band polarimetric radars.

Key words: Ka-band polarimetric radar, snowfall system, snow crystal, generating cell

1 はじめに

2017年3月27日に栃木県那須町の山岳地域において雪崩災害が発生した。これまでの調査から、南岸低気圧に伴う降雪中に積雪内に形成された弱層が破壊されて表層雪崩を引き起こしたと推定されており、弱層では雲粒付着の少ない板状等の雪結晶が検出された(中村ほか, 2017)。積雪内の弱層の有無を把握するためには、降雪時に雪結晶のタイプを面的に把握することが重要である。そのため、偏波レーダーによる貢献が期待されているが、低気圧に伴う層状性降雪雲に関して雪結晶のタイプに注目した偏波レーダー観測事例は少ない。また、国内ですでに普及しているXバンド偏波レーダーに加え、よりビーム幅が狭く(0.4deg以下)、高感度(距離20kmで-17dBZ)のスキャン型Kaバンド偏波レーダー(Maesaka et al, 2015)は、雪結晶タイプに関わる偏波パラメータ特性だけでなく、降雪形成過程に関わる降雪雲の微細構造も観測できると考えられる。このような新しい観測技術が雪結晶タイプの監視や早期検知に役立つ可能性も検討する必要があると考えられる。

2017年1月20日、日本の南海上を通過した複数の低気圧に伴い関東地方で降雪が報告された。防災科学技術研究所(以下、防災科研)では、この降雪システムを茨城県つくば市に設置したKaバンド偏波レーダーで観測した。本研究では、降雪システム内で観測された偏波パラメータの特徴と微細構造について解析を行った。

2 降雪の概況と環境場

つくば市周辺では、1月20日0900JST(Japan Standard Time; JST=UTC+9時間)頃から1130JST頃にかけて、防災科研で運用中の地上気象リポートシステム「ふるリポ!」(<https://fururipo.bosai.go.jp/fururipo/>)に降雪の報告が寄せられた。また地上では、樹枝状結晶や雲粒付き雪結晶およびそれらで構成される凝集雪片などが確認された。この降雪期間中は、日本の南海上を前線を伴わない2つの低気圧が通過しており(図1)、つくば市周辺はその北側の層状性降水領域に位置していた(図2)。館野における0900JSTの高層気象観測(図3)によると、地上から高度500mの気温は約0°C~2.8°C、相対湿度は44%~70%であり、降雪が開始した時刻には大気下層が比較的乾燥していたことが分かる。つくばにおけるアメダス観測

(図4)によると、降雪開始後の0900JSTから1000JSTにかけて、相対湿度が70%から84%まで高くなり、気温は0.4℃から0℃に低下した。その後地上での降雪が終了する1130JST頃にかけて、地上の相対湿度は約85%とほぼ一定であり、気温は徐々に上昇した。

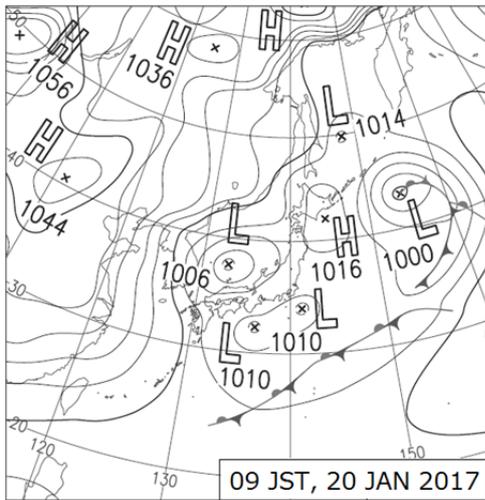


図-1 2017年1月20日0900JSTの地上天気図。

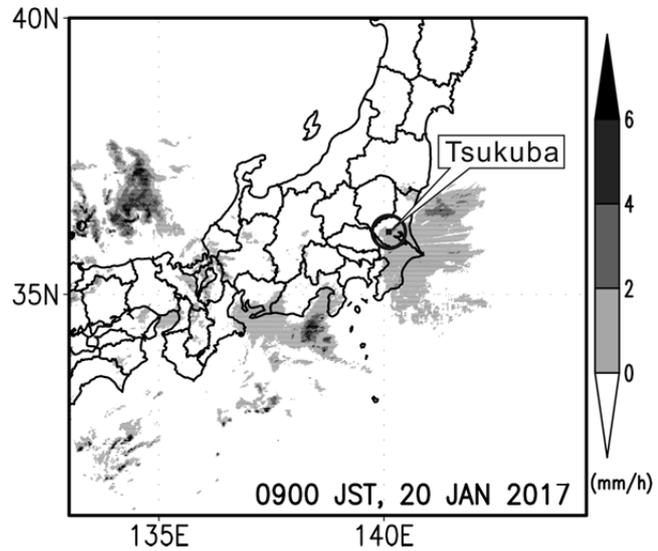


図-2 気象庁レーダー観測による2017年1月20日0900JSTの降水強度分布。丸で囲んだ領域は、つくば市に設置したKaバンド偏波レーダーの観測領域(半径30km)。

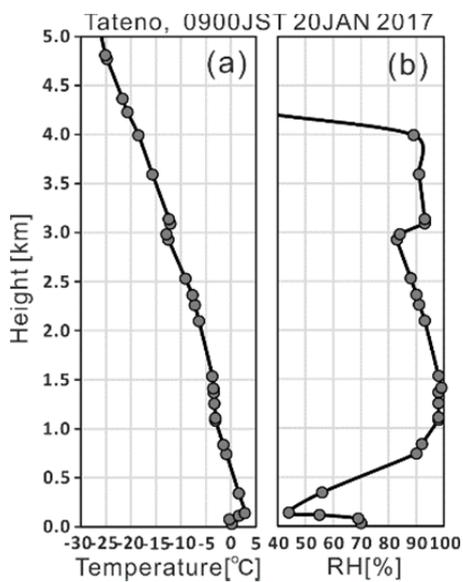


図-3 2017年1月20日0900JST館野における(a)気温と(b)相対湿度の高層観測データ。

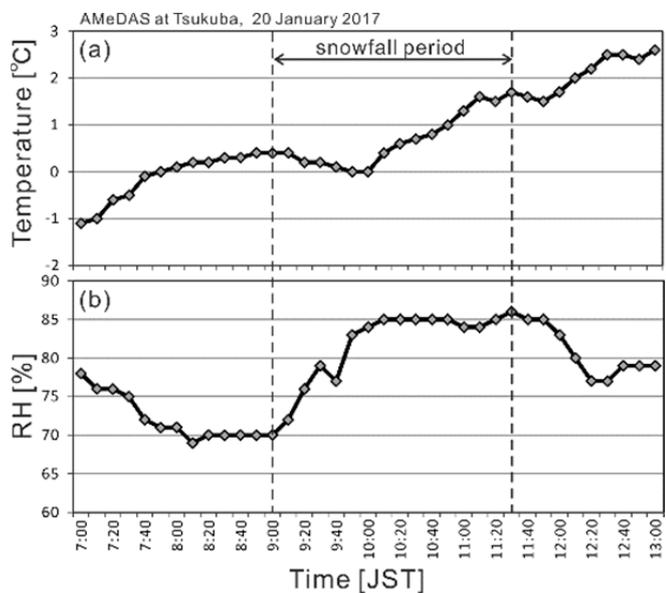


図-4 2017年1月20日つくばアメダス地点の(a)地上気温と(b)地上相対湿度。

表-1 防災科研 Ka バンド偏波レーダーの主要諸元.

タイプ・偏波	直交2偏波・HV同時送受信
周波数	Kaバンド(短パルス:34.815GHz,長パルス:34.82GHz)
空中線,ビーム幅	カセグレン方式円形パラボラ($\phi=2.2\text{m}$),0.31deg
利得,交差偏波識別度	52dB以上,30dB以上
送信出力	EIK,3kW
パルス幅	短パルス:1.0 μs ,長パルス:55 μs
PRF	2.5kHz以上(観測時設定 high:1980,low:1584)
レンジピン	150m
走査範囲(最大走査速度)	水平:0~360 deg(36 deg/sec) 垂直:-10~182 deg(12 deg/sec)
観測半径	30km

3 Ka バンド偏波レーダー観測

本研究では茨城県つくば市の防災科研に設置した Ka バンド偏波レーダーの観測データを利用した。表 1 にレーダーの主要諸元を示す。レーダーの観測範囲は図 2 に示す。解析対象である降雪システムについて、3 分毎に 6 仰角の PPI スキャン(仰角 5.2° から 27.2°)と 2 回の RHI スキャン(方位角 253.4°)を連続して行った。Ka バンド偏波レーダー観測では、レーダー反射因子($Z_h(\text{dBZ})$)、レーダー反射因子差($Z_{DR}(\text{dB})$)、偏波間位相差変化率($K_{DP}(\text{deg/km})$)、偏波間相関係数(ρ_{hv})、ドップラー速度($V(\text{m/s})$)などのパラメータが取得される。ここでは主に、顕著な特徴が見られた $Z_h(\text{dBZ})$ と $Z_{DR}(\text{dB})$ について報告する。なお本研究で示す $Z_h(\text{dBZ})$ は、水の誘電率を用いて換算した等価レーダー反射因子である。

この日つくば市のレーダーサイト上空では、早朝より層状性のレーダーエコーが観測されており、地上で雪が確認される直前の 0845JST 頃には、エコーが地上付近まで到達する様子がみられた(図省略)。図 5 と図 6 は、地上気温が降雪期間中で最も低く、地上の降雪も顕著であった 1000JST の PPI 画像と RHI 画像である。地上付近で観測されたエコーの高さは約 2.5km であったことが分かる。一方、高度 3.5km 付近(0900JST の館野のゾンデデータの気温は約 -15°C(図 3))には鉛直方向の厚みが数百 m 程度のレーダーエコーが層状に広がっていた。

高度 2.5km 以下に観測されたレーダーエコーは、 Z_h の最大値が 10dBZ 程度であり、 Z_{DR} は平均で 1dB 程度の値がエコーの全域に分布していた(図 5b, 図 6b, 図 7a)。特徴的なエコー構造として、レーダーエコー上端部(高度 2km から 2.5km 付近)に水平及び鉛直スケールが 1km 程度の生成セルの構造が捉えられた(図 5a と図 6a)。生成セルは、層状性降水の雲頂付近でしばしば観測され、小規模の対流を伴う。一般的に生成セル内部では氷晶の数濃度が高く、過冷却水滴が存在する事例の報告もあり、雪結晶が著しく成長すると考えられる(例えば、Kumjian et al. 2014)。本事例では、生成セル下方の高度 2km 以下で南西から北東の走向を持つストリーク状のエコーが地面付近まで到達していた(図 5a)ことから、上空の生成セルにおける雪結晶の形成や成長は、地上の降雪の強化にも貢献していたと考えられる。

高度 3.5km 付近に広がるエコーの Z_h の値の範囲(~5dBZ)は、下方のエコーの値とそれほど大きな違いはなかったが、 Z_{DR} は平均で 5dBZ 程度の大きな値が観測された(図 5b, 図 6b, 図 7b)。0900JST の高層気象観測による高度 3.5km 付近の気温はおよそ -15°C(図 3)であり、Orikasa and Murakami (2015)では -15°C 以上の気温で板状の氷粒子が卓越していたことが報告されている。そこで、高度 3.5km 付近のエコーを構成する雪結晶のタイプについて考察するため、板状結晶(軸比 0.1)を想定し、雪結晶の密度を変化させた散乱計算を T-matrix 法で行った(図 8)。粒子の密度を 0.917 g cm⁻³とした場合、等価直径 1mm 程度までの範囲において、 Z_{DR} は 4.7dB 程度となり、レーダー観測値に相当する大きな値であることが確認された(図 8b)。また、粒子の密度を 0.5 g cm⁻³と低くした場合、 Z_{DR} は 3dB 未満の値となり(図省略)、高度 3.5km 付近のエコーの Z_{DR} 観測値より顕著に小さい値となることが分かった。なお、図 8 の横軸は等価直径であるが、等価直径 1mm は軸比が 0.1 の場合の長軸直径約 2.1mm に相当する。また図 8 において、等価直径 1mm 程度までは Ka バンド帯と X バンド帯で Z_h , Z_{DR} 共に値に大差がないた

め、Ka バンド帯でもレイリー散乱と考えるとよさそうである。以上の結果より、高度 3.5km 付近のエコー領域を構成する雪粒子は、密度が高い板状の結晶であったと推定され、雲粒付着の少ない角板等の雪結晶であったと考えられる。一方、 Z_{DR} が 1dB 程度であった高度 2.5km 以下の下層エコーは、高度 3.5km 付近のエコーに比べ、密度が小さく、より球形に近い粒子で構成されていたと考えられる。地上では凝集雪片や雲粒付きの雪結晶が確認されており、散乱計算で得られた結果と矛盾しない。このように、Ka バンド偏波レーダー観測により、雪結晶のタイプに応じた偏波パラメータ特性を取得することができたと考えられる。

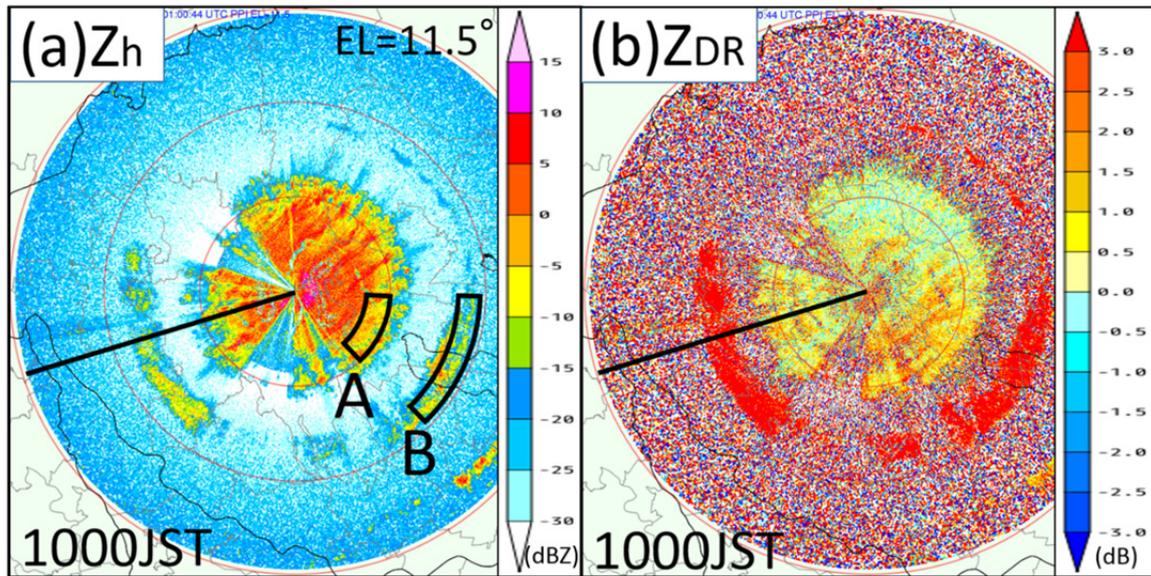


図-5 Ka バンド偏波レーダーで観測された 2017 年 1 月 20 日 1000JST の仰角 11.5° の PPI 画像. (a)レーダー反射因子, (b)レーダー反射因子差. 観測半径は 30km.

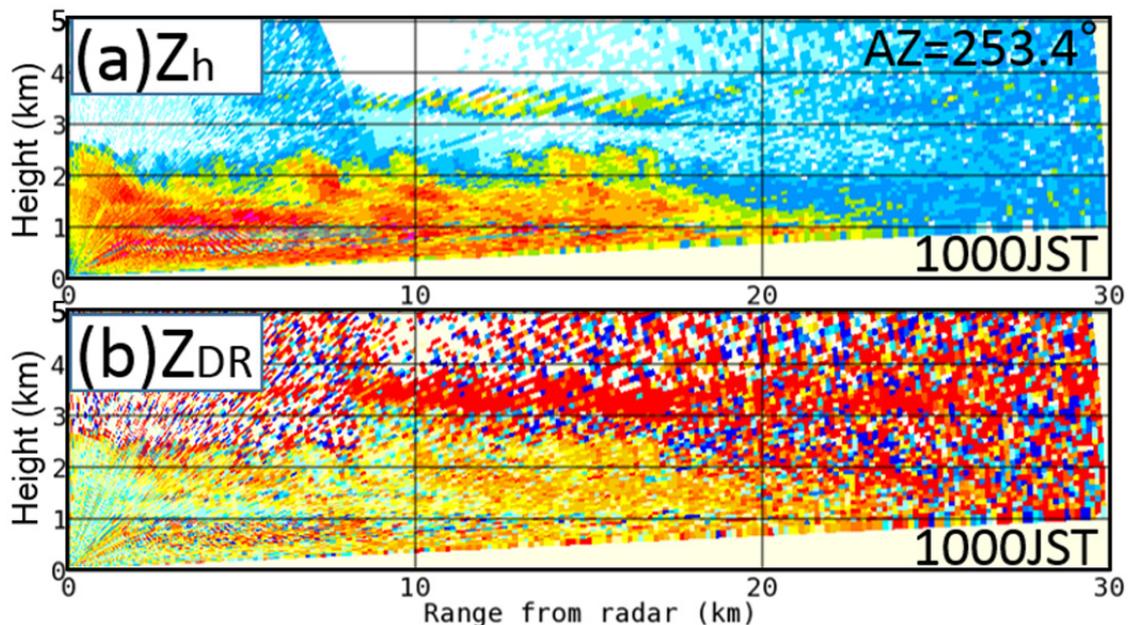


図-6 2017 年 1 月 20 日 1000JST の方位角 253.4° の RHI 画像. (a)レーダー反射因子, (b)レーダー反射因子差. 各パラメータのカラースケールは図 5 と同じ. RHI 画像の位置は図 5 に示す.

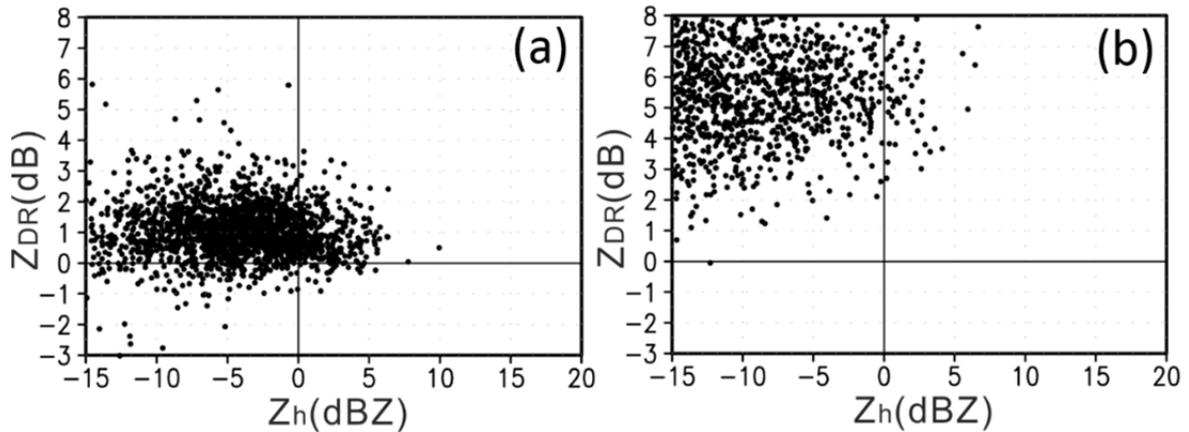


図-7 図5に示した(a)領域Aと(b)領域Bにおけるレーダー反射因子とレーダー反射因子差の関係.

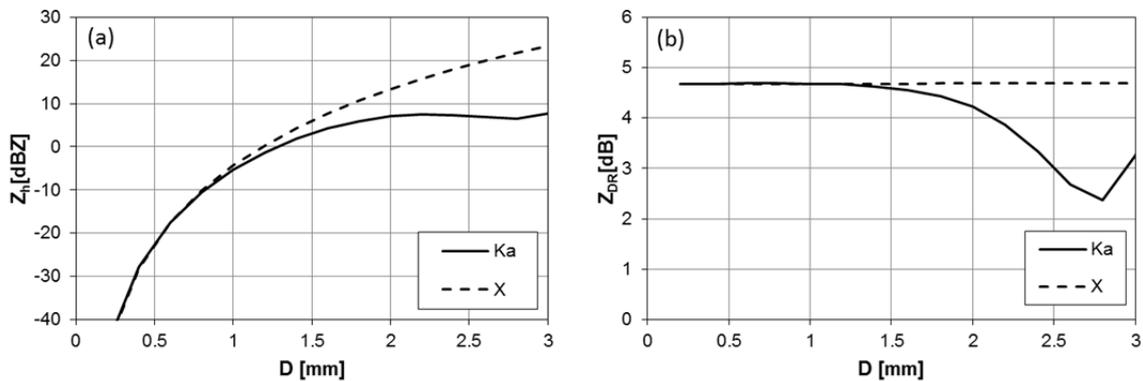


図-8 T-matrix 法による Ka バンドレーダー偏波パラメータの散乱計算結果. 参考のため, X バンドレーダーパラメータについても示す. 横軸は等価直径. 縦軸は(a)レーダー反射因子と(b)レーダー反射因子差. 計算は板状結晶を想定して行い, 以下の仮定を用いた. 温度: -15°C , 密度: 0.917g cm^{-3} , 軸比: 0.1, キャンティング角: (範囲) $0\sim 90^{\circ}$, (平均) 0° (分散) 20° , 仰角: 11.5° .

4 まとめ

2017年1月20日茨城県つくば市において, 低気圧に伴う層状性降雪システムを対象とした Ka バンド偏波レーダー観測を実施し, 雪結晶のタイプに関わる偏波パラメータの特徴と降雪形成過程に関わる微細構造について調査した.

地上での顕著な降雪が見られた時間帯には, 地上から高度約 2.5km までと, 高度 3.5km 付近に 2つのエコーが観測された. 高度 2.5km 以下のエコーの上端には生成セルが, その下方には地上付近まで到達するストリーク状のエコーが観測されており, 雪結晶の成長と地上降雪の強化に関わる降雪雲の構造を捉えることができた. また高度 3.5km 付近には Z_{DR} が大きい (平均で約 5dB) エコーが観測された. T-matrix 法の散乱計算により, 雲粒付着の少ない角板等の板状結晶 (高密度, 軸比小) で構成されていたことが示唆された. 一方, 高度 2.5km 以下のエコーでは Z_{DR} が小さかった (平均で約 1dB). 地上では凝集雪片や雲粒付きの雪結晶 (低密度, 軸比大) が確認されており, 低層における偏波パラメータと矛盾しない特徴がみられた.

2017年3月27日に那須町で雪崩災害が発生した際には, 表層雪崩の要因であったと推定される積雪内の弱層で, 雲粒付着の少ない板状等の, 比較的大型の雪結晶が検出された (中村ほか, 2017). この雪結晶のタイプは, 本研究で高度 3.5km 付近のエコーを構成すると示唆された雪結晶と共通する. そのため, 感度の高い Ka バンド偏波レーダーで Z_{DR} が高い領域を抽出することにより, 弱層形成に関わる降雪粒子を早期に検知できる可能性があると考えられる.

今後、Xバンド偏波レーダーに加えてKaバンド偏波レーダーでも、低気圧に伴う層状性降雪システムの観測を積極的に行い、雪結晶のタイプ毎の時空間分布と降雪形成過程に関わる観測的知見をさらに積み重ねて行くことが期待される。

謝辞

本研究は文部科学省科研費特別研究促進費「2017年3月27日に栃木県那須町で発生した雪崩災害に関する調査研究（課題番号：17K18453）」の一環として実施したものです。

引用文献

- 中村一樹・小杉建二・根本征樹, 2017: 那須町雪崩災害調査: 第1回調査(2017.3.28). (http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyouaigai/2017/report_20170328_NasuOnsen.pdf, 2018年2月28日確認)
- Kumjian, M. R., S. A. Rutledge, R. M. Rasmussen, P. C. Kennedy, and M. Dixon, 2014: High-resolution polarimetric radar observations of snow-generating cells. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1636-1658.
- Maesaka, T., K. Iwanami, S. I. Suzuki, Y. Shusse, and N. Sakurai, 2015: Cloud radar network in Tokyo metropolitan area for early detection of cumulonimbus generation. *Proc. 37th Conf. on Radar Meteorology.*, Norman, Oklahoma, Amer. Meteor. Soc., [Available online at https://ams.confex.com/ams/37RADAR/webprogram/Handout/Paper275910/37RadarConf_Maesaka_handout.pdf]
- Orikasa, N., and M. Murakami, 2015: Ice crystal shapes in midlatitude cirrus clouds derived from hydrometeor videosonde (HYVIS) observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 143-155.