

第 3 章

降雪状況の面的解析

降雪状況の面的解析 Analyses on the meteorological conditions and the distribution of snowfall

中井 専人¹⁾, 吉田 聡²⁾³⁾, 荒木 健太郎⁴⁾
出世 ゆかり⁵⁾, 岩波 越⁵⁾, 鈴木 真一⁵⁾, 橋本 明弘⁴⁾, 本吉 弘岐¹⁾
S. Nakai¹⁾, A. Kuwano-Yoshida²⁾³⁾, K. Araki⁴⁾
Y. Shusse⁵⁾, K. Iwanami⁵⁾, S. Suzuki⁵⁾, A. Hashimoto⁴⁾, H. Motoyoshi¹⁾

¹⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

¹⁾*Snow and Ice Research Center, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

²⁾京都大学防災研究所 白浜海象観測所

²⁾*Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

³⁾京都大学防災研究所 潮岬風力実験所

³⁾*Shionomisaki Wind Effect Laboratory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

⁴⁾気象庁 気象研究所

⁴⁾*Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency*

⁵⁾防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

⁵⁾*Storm, Flood and Landslide Research Division, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

Abstract: In this short section, the key points of the activity of the meteorological analysis group of this project is described. The in situ snow survey immediately after the avalanche accident showed two facts that came to be the start point of our analyses: Unusual heavy snowfall from the evening on March 26 to the morning on March 27, and a weak layer at 17 to 30 cm below the snow surface composed of poorly-rimed, typically plate-like snowflakes. The analyses were focused on 1) the process of development of cyclones, water vapor flux, and clouds that resulted in the heavy snow, and 2) the detection of characteristic snowfall that leads to the formation of the weak layer. The predictability of both phenomena was also investigated. The essence of the analysis result is listed, for example, importance of water vapor flux, seeder-feeder mechanism and orographic effect. New method of prediction of snowfall particles was first applied to the real case. The result of the method was consistent to the radar analysis showing that the time of the formation of the weak layer seems to be before midnight. New technology, Ka-band radar analysis detected plate-like crystal layer of another case, showing a possibility of its future contribution to the prediction of weak layer of south-coast cyclones. The details of these analyses are presented in the following sections.

Key words: South-coast cyclone, Predictability, Radar, Cloud microphysics, Orographic effect

1 研究方針の検討

2017年3月27日に那須温泉ファミリースキー場付近の山岳地で発生した災害雪崩については、翌日に現地入りした調査チームにより、積雪状態が明らかにされている(中村ほか, 2017). 特に、1)26日夕方から27日午前中にかけてのこの時期としては稀な大雪による新雪荷重がある状態で、2)積雪表面から17cm~30cm下の雲粒付着の少ない板状等の降雪結晶の弱層が破壊されて表層雪崩が発生した、の2点が降雪状況の解析においてもポイントとなった。このような状況をもたらした降雪はどのような総観場、降水系によってもたらされたか、研究開始時の検討において、次のような指摘と方向付けがなされた。

- ◆ 今回の事例では現地の降雪量がかなり多く、地形による降雪の集中が考えられる。従って、離れた場所の気象観測点データから観測点のない現地降雪量を推定するだけでは必ずしも十分ではない。

- ◆ レーダーや気象モデルなどを用いて、降雪量と降雪粒子のメソスケール(数百 km～数 km)の分布について調査する。
 - 1)降雪をもたらした低気圧の発達状況と構造、関東地方への水蒸気輸送について客観解析データ等を用いて明らかにする。
 - 2)面的な降雪種、降水量推定について現在のレーダー観測、解析技術を活用して調査する。
 - 3)地形性降雪の影響も含めて、今回の災害にかかわる「多量の降雪」の形成過程について数値モデルによる調査を行う。
- ◆ 雪崩の弱層形成にかかわる降雪イベントについて、現在の技術を用いた降雪粒子結晶形状の識別可能性についても検討する。
- ◆ 正確な降雪量、降雪種分布は、今後、観測点のない山岳の雪崩危険度判断を確実にしていくために必要である。
- ◆ 降雪状況の解析についての研究会を開催し、研究まとめにむけて進捗と成果の整理を行う。

以上の検討をもとに研究を行った。進捗に応じて、個別の打ち合わせと本研究全体打ち合わせ以外に、5月と10月に降雪研究グループでのミーティングを行った。また、研究まとめに向けた議論のため、2017年11月21-22日に長岡市において「ワークショップ 降雪に関するレーダーと数値モデルによる研究 in 長岡 ～ 雪崩につながる不安定積雪を作る降雪～」を開催した。

2 研究成果の要点

以上のように実施してきた研究の成果を整理すると、2017年3月26日から27日にかけての降雪状況、及びその予測、解析、技術的展望などについて、次のことが指摘できる。

- 現地調査の重要性
 - 積雪断面観測により雲粒付着の少ない降雪粒子の弱層と上載荷重が指摘されたことは調査の方向付けに非常に重要であった。
- 低気圧の特性と予測
 - 海面気圧場は4日前から予報できていたが水蒸気流入量予測は直前でも過少。
 - 東風による水蒸気流入量の多いところで多量の降雪となる(南岸低気圧か、その後ろに形成される小低気圧かを問わない。)。
- 上載荷重積雪を形成した降雪過程
 - 東風による下層地形性雲が形成され、Seeder-Feederによる降雪増幅が働いた。
 - Seederとなった上層の雲には生成セルがあり、Feederとなった下層の雲では降水に対する山岳地形の寄与が大きかった。
- 弱層を形成した降雪過程
 - 日付が変わる前後の一様性の高い降水強度と風の場合が弱層に寄与した可能性がある。
 - 日付が変わる前に雲粒捕捉のない時間帯があり、弱層に対応の可能性がある。
 - 上載荷重形成時とは上空風向が異なり Seeder-Feeder が働かなかった。
- 将来の研究の方向
 - Ka バンドレーダーで生成セル構造と高密度 Plate を検知し、降雪強化と弱層の解析に可能性を見いだした。
 - 気温毎昇華成長、雲粒捕捉成長の比率を積雪断面に対応させて出力できた。数値気象モデルによる粒子情報は、弱層形成の可能性をある程度表現し得る。

それぞれの成果の詳細は、この後に続く節を参照されたい。

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24日確認)

2017 年 3 月 27 日の那須雪崩をもたらした低気圧の予測可能性
Predictability of an Extratropical Cyclone Causing Snow Avalanche at Nasu on
27th March 2017

吉田 聡^{1), 2)}
A. Kuwano-Yoshida^{1), 2)}

¹⁾京都大学防災研究所 白浜海象観測所

¹⁾*Shirahama Oceanographic Observatory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

²⁾京都大学防災研究所 潮岬風力実験所

²⁾*Shionomisaki Wind Effect Laboratory, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*

Abstract: On 27th March 2017, a snow avalanche occurred at Nasu. Seven high school students and a teacher became victimized by the snow avalanche. Before then, an explosive extratropical cyclone passing the south coast of Japan precipitated a massive snow rapidly. Statistical predictability analysis of weekly ensemble prediction system of Japan Meteorological Agency shows that the system tends to underestimate explosive cyclone's development passing the south coast compared with cyclones developed over the northern part of Japan. The Nasu case could not be predicted until four days before, the position shifted northwestward even in one day prediction. However, moisture flow pattern to Nasu which is snow origin were predicted from five days before, while the moisture amount is less than observations. The predictability depended on an antecedent ridge. In failed prediction, the weak development of ridge caused weak development of the following cyclone.

Key words: Extratropical cyclone, Predictability, Moisture flux, Numerical weather prediction (max: 5)

1 はじめに

これまでの調査で、2017 年 3 月 27 日に那須高原で発生した雪崩は日本南岸を通過した低気圧がもたらした急激な積雪の増加が要因の一つと報告されている。しかし、気象庁の週間アンサンブル予報では、南岸低気圧は日本海で発達する低気圧に比べ、予測精度が低いことが指摘されている（吉田 2018）。今回の低気圧とそれに伴う降雪がどのくらい前から予測できていたかを明らかにすることは、防災上重要である。そこで本研究では、気象庁週間アンサンブル予報における、今回の低気圧の発達とそれに伴う水蒸気移流の予測可能性を調査した。

2 データと手法

用いたデータは京大生存圏研究所にアーカイブされている気象庁週間アンサンブル予報データである。アンサンブルメンバー数は 27 で、日本付近は水平解像度 1.25° 、6 時間毎、全球データは 2.5° 、12 時間毎の予報が保存されている。毎日 00UTC と 12UTC を初期値として 11 日間予報をしている。今回は 8 日予報までのデータを利用した。日本付近の予報値はジオポテンシャル高度、気温、東西風、南北風の 925 hPa, 850 hPa, 500 hPa 面、湿度の 925 hPa, 850 hPa 面が、全球予報値はジオポテンシャル高度、気温、東西風、南北風の 850 hPa, 500 hPa, 300 hPa 面、湿度の 850 hPa 面が保存されている。

低気圧の発達指標として、地表気圧の 24 時間変化率を緯度 60° で規格化した LDR24 (Kuwano-Yoshida, 2014)

$$\text{LDR24} = - \frac{p_s(t) - p_s(t - 24h)}{24h} \left| \frac{\sin 60^\circ}{\sin \theta} \right|$$

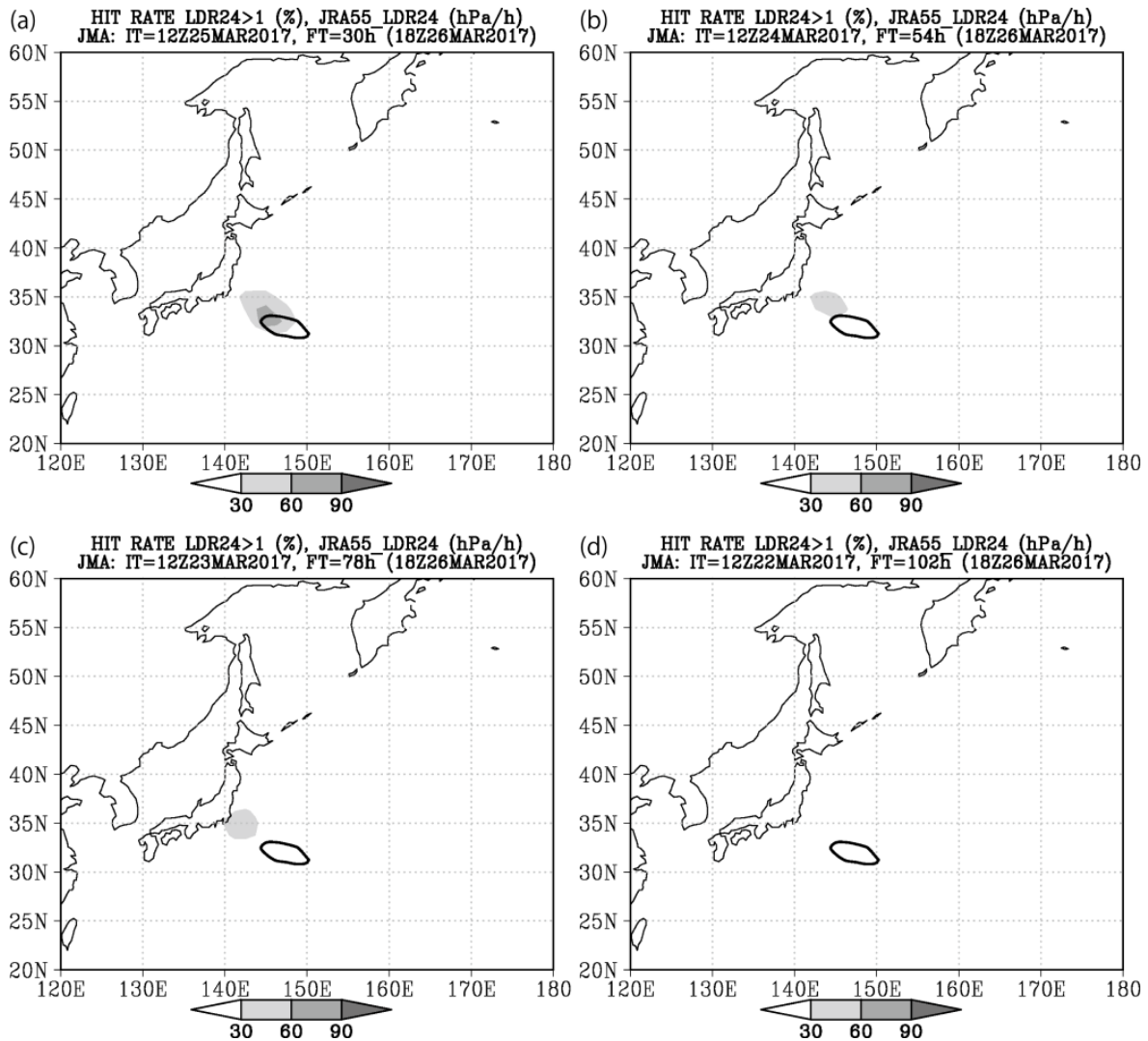


図 1. 2017 年 3 月 26 日 18UTC に気象庁週間アンサンブル予報で $LDR24 \geq 1$ となるメンバーの割合（陰影，%）と JRA-55 の $LDR24 = 1$ （太実線）．それぞれ（a）2017 年 3 月 25 日 12UTC，（b）24 日 12UTC，（c）23 日 12UTC，（d）22 日 12UTC 初期値．

を利用し， $LDR24 \geq 1 \text{ hPa/h}$ を爆弾低気圧とした．ここで p_s は地表面気圧， t は時間， θ は緯度である．予報精度評価のため，気象庁長期再解析データ JRA-55 (Kobayashi et al., 2015) を比較データとして用いた．JRA-55 の水平解像度は 1.25 度で 6 時間毎の解析値を用いた．

3 結果

今回，那須雪崩の要因の一つとなった低気圧は 2017 年 3 月 25 日 00UTC に九州南方沖で発生した．その後，東進しながら 26 日 18UTC に関東の南東沖で急発達し，爆弾低気圧に相当する発達率 ($LDR24 \geq 1$) を示した．アンサンブル予報の各格子で全メンバーのうち $LDR24 \geq 1$ となったメンバーの割合を的中率として，異なる初期時刻からの予報結果を図 1 に示す．22 日 12UTC 初期値からの予報では当該低気圧の急発達を予報したメンバーは一つもなく（図 1d），23 日 12UTC 初期値以降に急発達を予報するメンバーが現れ始めている（図 1c）．しかし，その割合は 30%程度で推移し，直前の 25 日 12UTC 初期値の予報でも 60%程度であった（図 1a）．また，急発達が起こる位置は実際の発達位置に比べて北西方向にずれる傾向があり，低気圧の発達予報としては難しい事例であった．しかし，日本付近の海面気圧の空間分布について，アンサンブル予報の各メンバーと JRA-55 との空間相関を調べると，22 日 00UTC 初期値まではアンサンブルメンバー間のばらつきは大きい，22 日 12UTC 以降の初期値では，予報のばらつきが小さくなっていた（図 2）．この結果は，個々の低気圧の発達強度の予報可能性は 1 日

程度しかなかったが、水蒸気の流れを決める海面気圧の空間パターンは4日程度前から予測できていたことを示している。

実際、急激な積雪の増加の要因となった低気圧から那須高原上空への水蒸気流入の予測を調べると、21日00UTC初期値の予報では東からの水蒸気フラックスは見られず、那須上空の水蒸気量の増加も予報できていなかった(図3a, b)。一方、海面気圧の空間分布の予報ができてきた22日12UTC初期値からの予報では、東からの水蒸気フラックスが予報され始めている。しかし、その大きさは解析値よりも弱かった(図3c, d)。雪崩発生直前の25日12UTC初期値からの予報では水蒸気量は立ち上がりピーク時刻が遅れる傾向があるものの、東からの大きな水蒸気フラックスと水蒸気量の急激な増加が高い確率で予測されていた(図3e, f)。また、低気圧発達前の乾燥状態の予報は21日12UTC初期値でも精度よく予報されていることから、低気圧の発達予測が水蒸気流入を左右していることがわかる。

この予測精度の急激な変化の要因を明らかにするため、那須上空の水蒸気量予報の不確定性が大きく改善した21日12UTC初期値とその直前の21日00UTC初期値の予報を比較した。22日00UTCの300 hPa ジオポテンシャル高度予報を見ると、21日12UTC初期値からの予報の方がカスピ海南東で高度場が高く、カスピ海南部のスプレッドが小さくなっていた(図4a, b)。その後、東経80度付近で大きくスプレッドが減少し、アンサンブル平均場には北東方向に延びる波列パターンが形成されていた(図4c, d)。那須で雪崩が発生した頃の27日00UTCでは、日本上空でスプレッドの小さい低高度偏差が現れていた(図4e, f)。爆弾低気圧は上空のトラフの接近をきっかけとして急発達することから、この結果は、対流圏上空の高度場偏差の不確定性がカスピ海付近で弱まったことで、その後の日本付近での低気圧発達をもたらす上層トラフの不確定性が小さくなったことを示している。

以上の結果より、那須雪崩の要因となった低気圧の正確な予測は直前まで予測が難しく、積雪の増加をもたらした水蒸気流入もピーク時刻が遅れる傾向があり、流入量も過小評価されていた一方で、那須への東からの水蒸気流入傾向は4日程度前から確度が高かったことがわかった。

4 まとめ

那須雪崩の要因となった低気圧とそれに伴う水蒸気流入の予測可能性について、気象庁週間アンサンブル予報データを用いて解析した。低気圧そのものの発達には4日前の時点では全く予報されておらず、1日前でも北西方向にずれて予報される傾向を持ったまま、水蒸気流入も過小に予報されていた。しかし、水蒸気流入を決める海面気圧の空間パターンは4日前から精度よく予報されていた。ただし、水蒸気流入量の予測は直前でも過少評価傾向にあり、数日程度のリードタイムをもって、雪崩当日の急激な積雪の増加を予想するのは難しい事例であった。現在の予報技術では南岸低気圧は比較的予報のリードタイムが短く、雪崩の誘因となる降雪量の急激な増加を数日前から予測することは難しいことを考慮した対策が必要である。

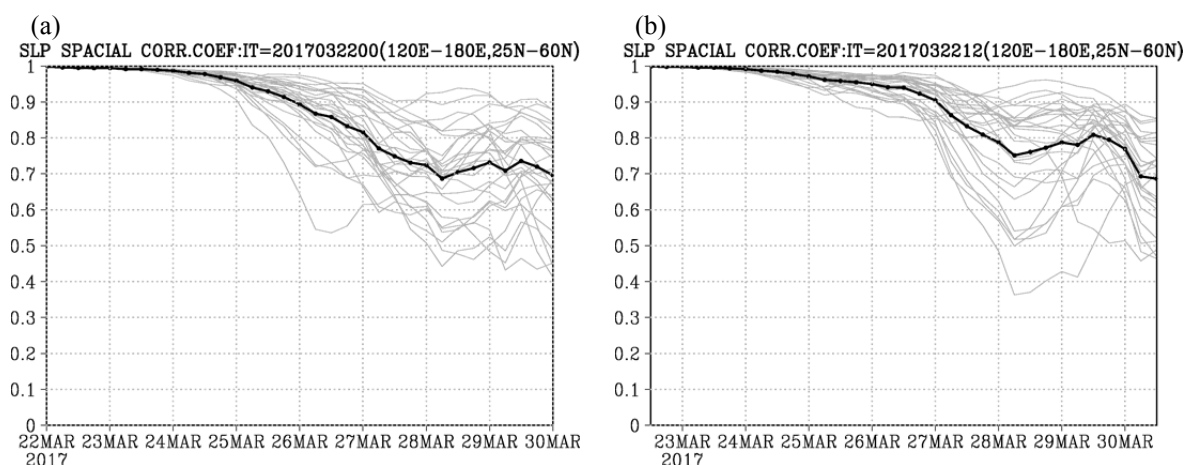


図2. 日本付近(東経120度~180度, 北緯25度~60度)の海面気圧のアンサンブル予報とJRA-55との空間相関. 黒: 平均, 灰色: 各メンバー. (a) 2017年3月22日00UTC初期値, (b) 22日12UTC初期値.

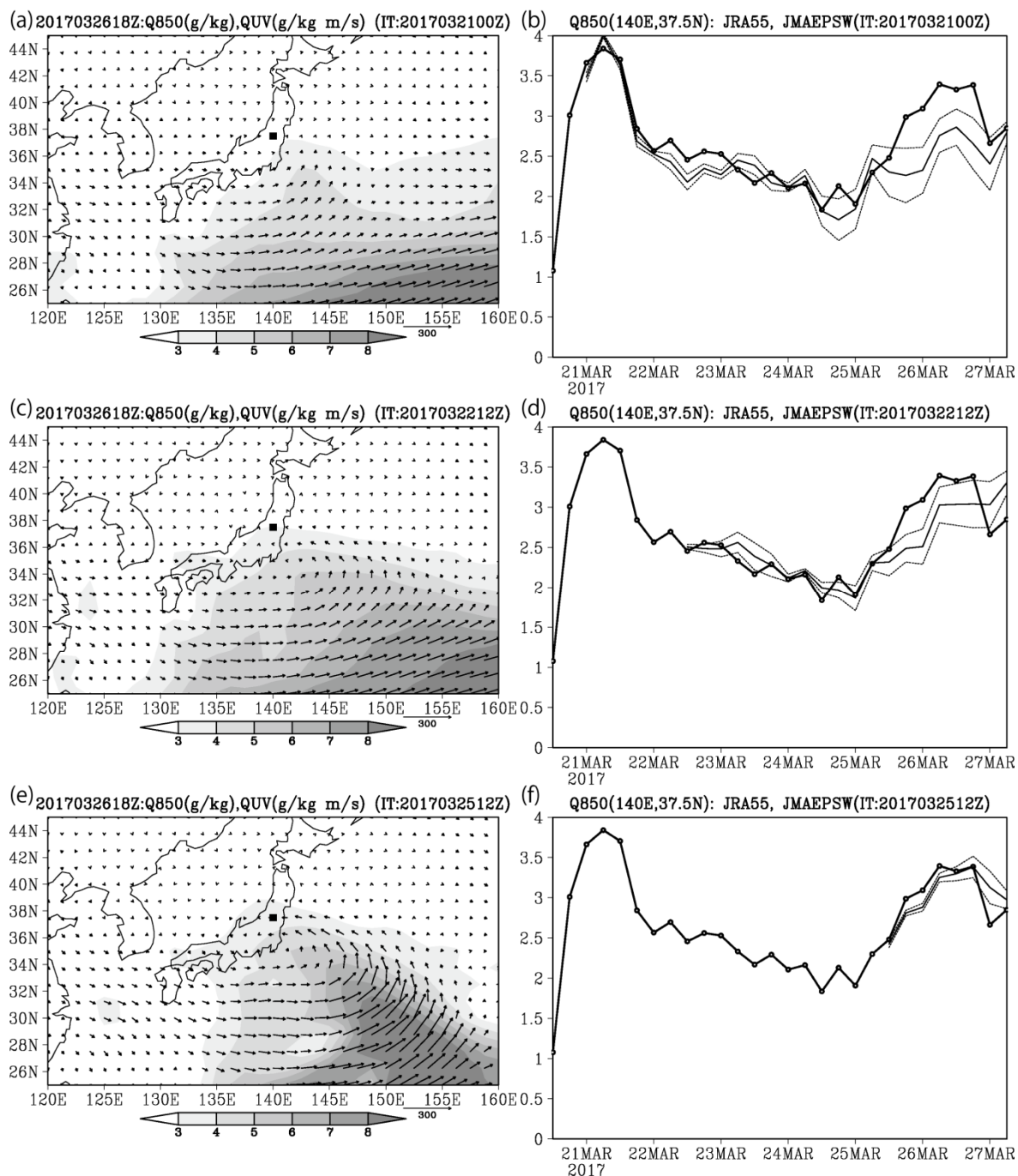


図3. (左) 2017年3月26日18UTCの850hPaの比湿(陰影, g/kg)と水平水蒸気フラックス(矢印, g/kg m/s), (右) 那須高原直近の格子(140°E, 37.5°N)の850hPa比湿の時系列: JRA-55(太実線), アンサンブル予報平均(細実線)と ± 0.5 標準偏差(破線). (a) (b) 21日00UTC, (c) (d) 22日12UTC, (e) (f) 25日12UTC初期値.

引用文献

- 吉田 聡, 2018, 爆弾低気圧の予測可能性, 気象研究ノート「南岸低気圧による大雪」, 印刷中.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteorol. Soc. Japan. Ser. II*, **93**, 5–48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Kuwano-Yoshida, A., 2014: Using the Local Deepening Rate to Indicate Extratropical Cyclone Activity. *SOLA*, **10**, 199–203, doi:10.2151/sola.2014-042.

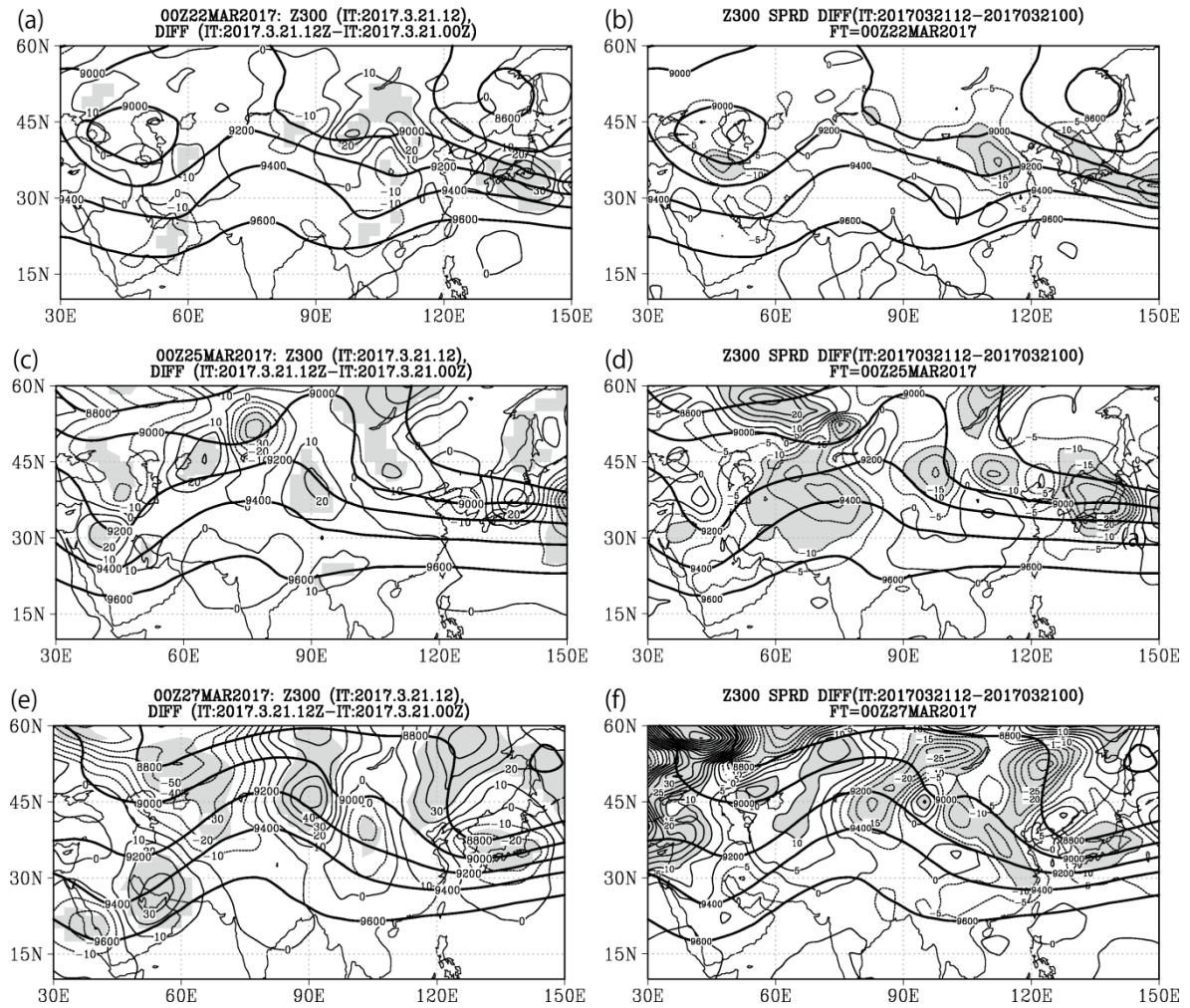


図4. 2017年3月21日12UTC初期値と20日UTC初期値の300hPaジオポテンシャル高度
(m) 予報の差(細実線)と21日12UTC初期値の予報値(太実線). (左) アンサンブル
平均(陰影は95%有意かつ差が10m以上), (右) アンサンブルスプレッド(陰影は差
が10m以上). (a) (b) 22日00UTC, (c) (d) 25日00UTC, (e) (f) 27日00UTC.

那須における表層雪崩発生に関わる低気圧性大雪の特性 Characteristics of heavy snowfall associated with cyclones causing surface avalanche in Nasu

荒木 健太郎¹⁾

K. Araki¹⁾

¹⁾気象庁気象研究所

¹⁾Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

Abstract: A heavy snowfall associated with cyclones caused a surface avalanche in Nasu in Japan on 27 March 2017. It is known that large amounts of snowfall in a short time are important for occurrence of surface avalanches, however, understanding of snowfall characteristics in mountain regions during heavy snowfall events is lacking. In this study, a case study on this case was performed. In addition, we conducted statistical analysis on the cases in Nasu from 1989 to 2017 and investigated the characteristics of snowfall and meteorological conditions. As the result of the case study, low-level supercooled water clouds were formed by orographically-forced updraft in mountain regions in Nasu as moist northerly and easterly flows were intensified due to the cyclone approach on 27 March 2017. It is found that the heavy snowfall in a short time was caused the local snowfall intensification by the Seeder-Feeder mechanism associated with the low-level clouds and snowfall from upper clouds of the cyclone. As the result of statistical analysis, it is found that heavy snowfall events of similar amounts as this case occurred once every 3 years, and in March every 19 years. The surface pressure patterns in heavy snowfall cases in Nasu were about 63% in typical winter monsoon pattern and about 30% in cyclones. Although snowfall amounts became larger as snowfall duration was longer in both patterns, some heavy snowfalls in a short time exceptionally occurred in cyclone cases, where the occluded cyclones passed near the Kanto region.

Key words: South-Coast Cyclone, heavy snowfall, avalanche

1 はじめに

2017年3月27日に本州南岸を通過する低気圧に伴って那須で大雪が起こり、表層雪崩が発生した。現地調査結果から、雲粒付着の少ない弱層上部には一部雲粒付着した降雪結晶による多量の降雪が起こり、表層雪崩に至ったと推定されている（防災科学技術研究所，2017）。本研究では、この短時間での大雪に注目し、那須に大雪をもたらす降雪雲の環境場や降雪特性を理解することを目的に、数値実験等を通じた那須雪崩事例の解析、および再解析データ等を用いた統計解析を行った。詳細については荒木（2018a）を参照いただきたい。

2 2017年3月27日那須雪崩の事例解析

2.1 解析データ・数値実験の設定

降雪実況と環境場の解析には各種レーダー・地上・高層気象観測、気象庁メソ客観解析等を用いた。数値実験は気象庁非静力学モデル（Saito et al., 2006）を用い、まず水平解像度 1.5 km で東日本を覆う 1,425 km 四方を計算領域とした。初期値・境界値に気象庁メソ客観解析を用い、26日12時～27日21時（JST，以下同様）を対象に計算を行った（1.5km-NHM）。次に、この結果から初期値・境界値を作成し、26日21時～27日15時を対象に那須を含む 237.5 km 四方の領域で水平解像度 250 m の実験を行った（250m-NHM）。これらの実験では雲氷・雪・霰を 2-moment バルク法で扱う雲物理過程を用いた。また、降雪に対する地形の影響を確認するため、那須岳の標高を 500m にする実験（NASU500）と全地形を除去する実験（NOZS）を行った。

2.2 低気圧と降雪環境場の特徴

3月26～27日にかけて、上空の寒気トラフ通過に伴い、前線を伴う温帯低気圧（南岸低気圧）が本州南海上を通過した。那須に降雪をもたらした低気圧は南岸低気圧中心の西側で 27

日 0～3 時に発生したもので、前線を伴っていなかった。アメダス那須高原では 27 日 1 時には積雪深が 0 cm だったが、これ以降に積雪深が増え、10 時には 34 cm に達した。26 日午後には南岸低気圧の Warm Conveyor Belt (Browning, 1990) に対応する 850 hPa の水蒸気フラックス量の大きい領域が南岸低気圧中心の北側にのび、27 日 3 時には北東～東の風で那須に流入していた (図-1)。その後も那須周辺では後続の低気圧接近に伴う北～東風による水蒸気供給の多い状態が持続していた。

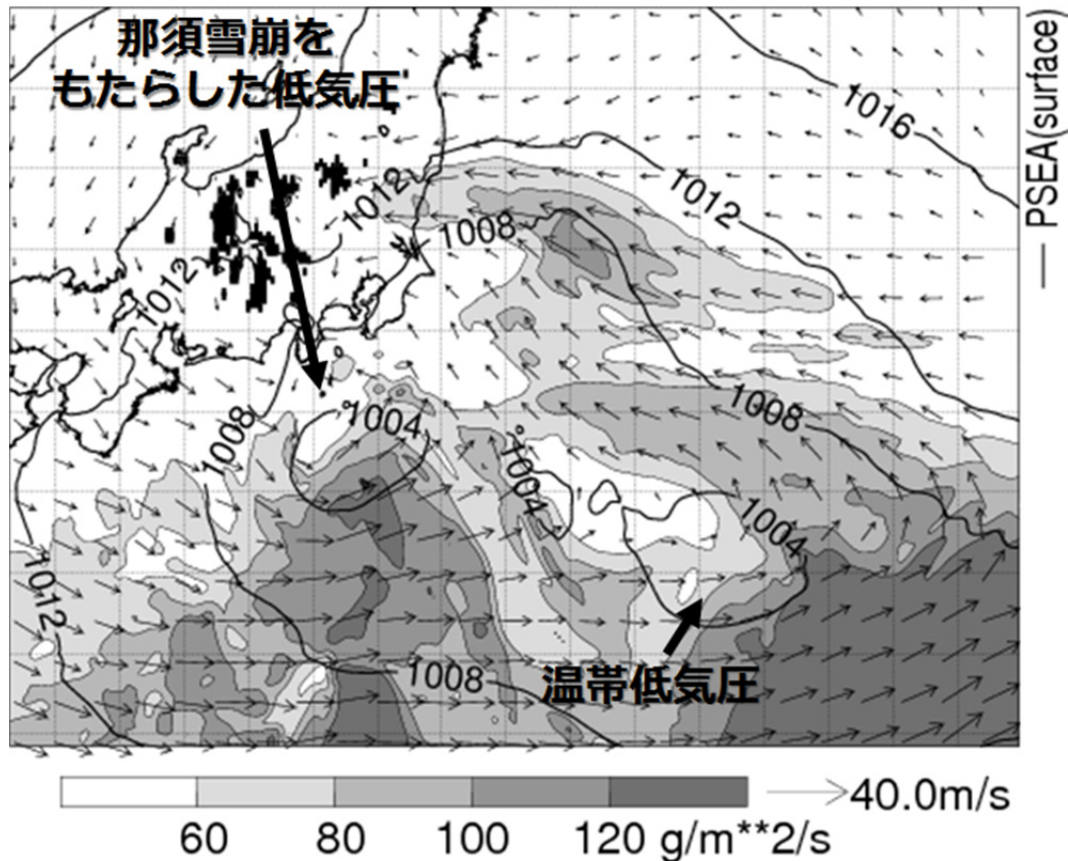


図-1 気象庁メソ客観解析による 3 月 27 日 3 時の 850hPa における水蒸気フラックス量 (陰影) と水平風 (ベクトル), 海面気圧 (等値線, hPa)。

2.3 降雪の集中と降雪種に対する地形の影響

数値実験で再現された気象場や降水状況は、実況よりやや遅れたものの観測とよく整合していた。那須周辺では特に那須岳の北～東側斜面に雪による総降水量が多く、降雪が集中していた (図-2)。那須岳周辺では降雪開始初期に高度約 3km 以下で南寄りの風だったが、徐々に東寄りの風に変わり、強い降雪が持続した時間では高度約 2～2.5 km 以下で北～東の風が吹き風速も強まった。この頃から那須岳の北東斜面上空では高度約 2 km 以下に 0.5～1 m s⁻¹ の地形性上昇流が継続的に形成され、雪混合比も大きくなった (図-3a)。この上昇流域では過冷却雲粒も発生していた (図-3b)。低気圧に伴う多量の水蒸気供給により降雪粒子の昇華成長が促進されたことに加え、地形性上昇流による過冷却雲粒形成で雲粒捕捉成長が効率的に行われ、Seeder-Feeder メカニズム (Houze, 2012) による降雪強化が山地斜面上空の大気下層で起こっていたことが示唆される。26 日 21 時～27 日 15 時の第 2 図青破線領域での雪による平均総降水量は 250m-NHM で約 26 mm, NASU500 で約 11 mm, NOZS で約 5 mm であり、後者 2 つの実験では降雪の集中は見られなかった。

これらのことから、那須岳や周辺地形が降雪の局地的な集中に非常に重要であることがわかった。地形影響を受けない降雪の後、山地斜面上空で発生した過冷却雲粒の影響を受けた強い降雪が持続し、現地調査結果の報告で述べられたものと同様に表層雪崩を起こしうる特性を持つ降雪が起こったと考えられる。

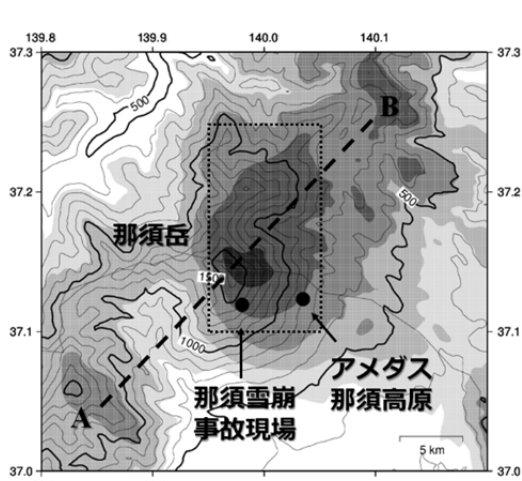


図-2 250m-NHMによる26日21時から27日15時までの雪による積算降水量(陰影). 等値線はモデルにおける標高(m).

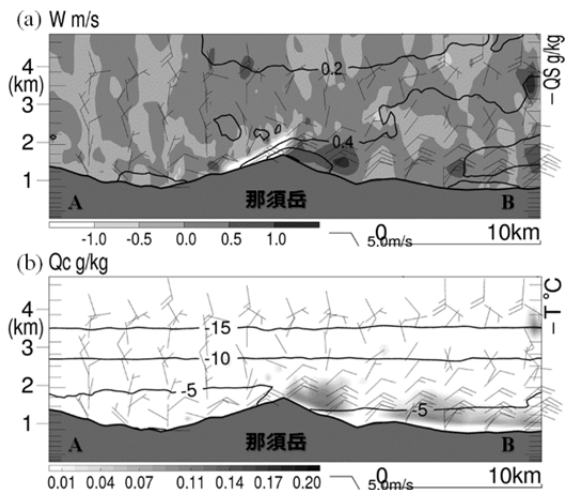


図-3 250m-NHMによる27日8時30分の図-2中AB線分の鉛直断面図。(a)鉛直流(塗分)・雪混合比(等値線), (b)雲水混合比(塗分)・気温(等値線). 矢羽は各高度における水平風を意味する.

3 那須大雪の統計解析

3.1 極値統計解析

那須雪崩事例の特異性を把握し、那須大雪時の降雪・気象場の特性するため、アメダス那須高原の毎時の積雪深観測データのある1989年11月～2017年4月を対象に統計解析を行った。まず、この期間のアメダス那須高原における日降雪深が1cm以上の事例(1,665例)を抽出して極値統計解析を行った。日降雪深は1～24時の毎時の降雪深の合計とし、閾値統計であるHazen plotを採用した。日降雪深1cm以上の降雪日に対して再現期間を求め、これを那須での寒候年平均降雪日数(約59日)で割り、那須雪崩事例が何シーズンに1度の規模の大雪であるかを調べた(図-4)。その結果、那須雪崩事例の再現期間は約3寒候年であり、3シーズンに1度程度は起こる大雪だった。一方、3月の事例のみを対象とすると、那須雪崩事例の日降雪深は3月では最も大きく、再現期間は約19年だった。春の大雪としては稀な事例だったといえる。

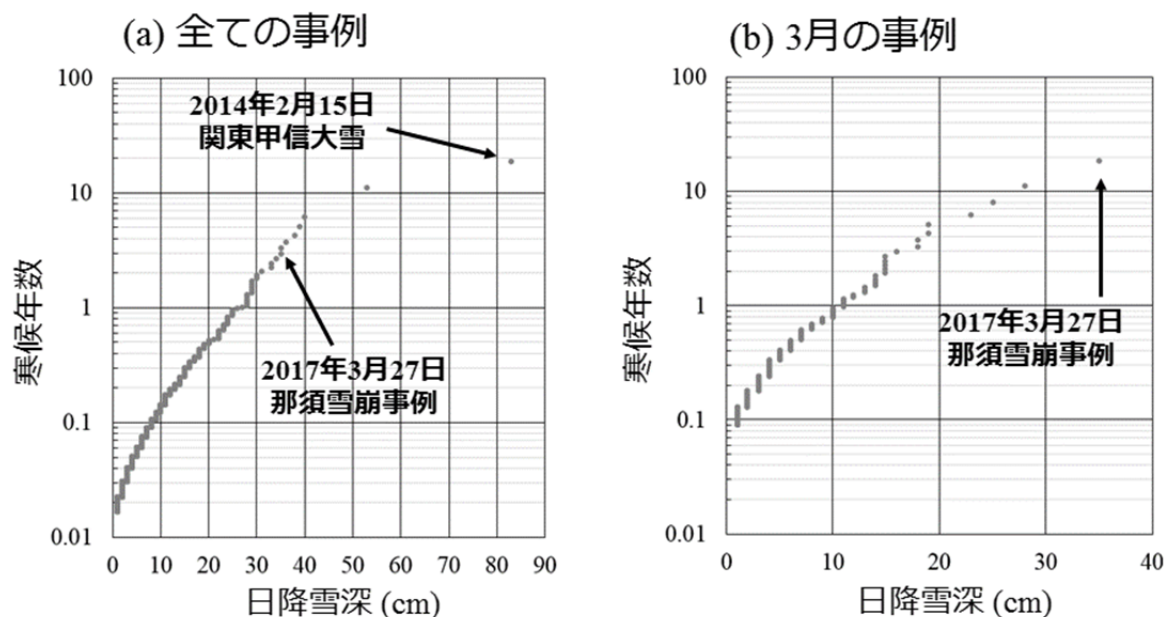


図-4 アメダス那須高原・日降雪深の再現期間曲線。

(a) 日降雪深1cm以上の全事例, (b) 3月のみ。

3.2 気圧配置パターン毎の環境場

次に、アメダス那須高原での日降雪深が 10cm 以上の 226 事例について、降雪特性と気象場の統計解析を行った。事例毎に気圧配置パターンを地上天気図で分類すると、冬型（WIN）が 142 事例（63%）、前線を伴う南岸低気圧（SCC）が 57 事例（25%）、那須雪崩事例のように前線を伴わない低気圧が 11 事例（5%）だった（表-1）。

表-1 1989 年 11 月～2017 年 4 月のアメダス那須高原で、日降雪深 10cm 以上の事例について分類した気圧配置パターン。

略称	パターン	事例数	割合(%)	説明
WIN	冬型	142	62.8	冬型の気圧配置時の降雪
SCC	南岸低気圧	57	25.2	前線を伴う温帯低気圧（南岸低気圧）による降雪
SCCNF	低気圧	11	4.9	前線を伴わない本州南岸の低気圧による降雪
Other	その他	16	7.1	停滞前線，二つ玉低気圧などによる降雪

パターン毎にアメダス那須高原での地上観測の特性を調べると、各事例の日最大降雪深を観測した時刻では WIN では西北西～北西の風、SCC と SCCNF では北北西～北北東の風が卓越するという違いが見られた（図略）。しかし、日最大降雪深や日降雪深などにはパターン間の有意な差は見られなかった。

また、事例毎の日最大降雪深を観測した時刻に最も近い時刻の気象庁 55 年長期再解析（JRA-55, Kobayashi et al., 2015）データを用い、気象場の特徴を調査した。SCC と SCCNF の平均場では、上空の気圧の谷の位置や低気圧の強さにやや違いが見られたが、同じような環境場だった。那須周辺の 850hPa の気温と水蒸気フラックス量を比較したところ、WIN については -5°C 以下のものがほとんどで、SCC と SCCNF はそれより高温の事例が多かった（図-5）。一方、水蒸気フラックス量は SCC では 3 事例が飛び抜けて大きな値だったが、その他はどのパターンでも大差はなかった。

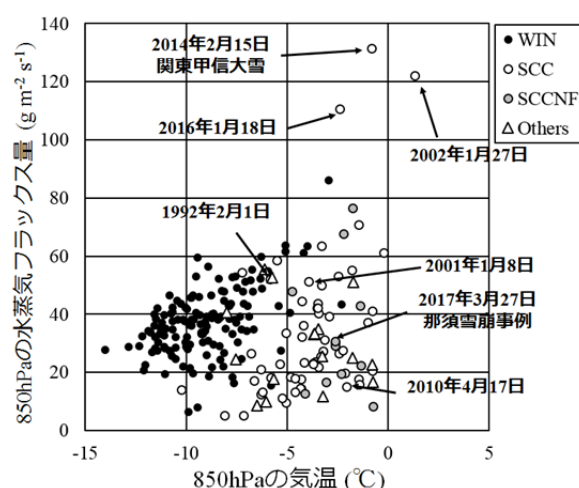


図-5 気圧配置パターン毎の那須周辺における気象場の特性. アメダス那須高原で日最大降雪深が観測された時刻付近の 850hPa における気温と水蒸気フラックス量の関係を表す。

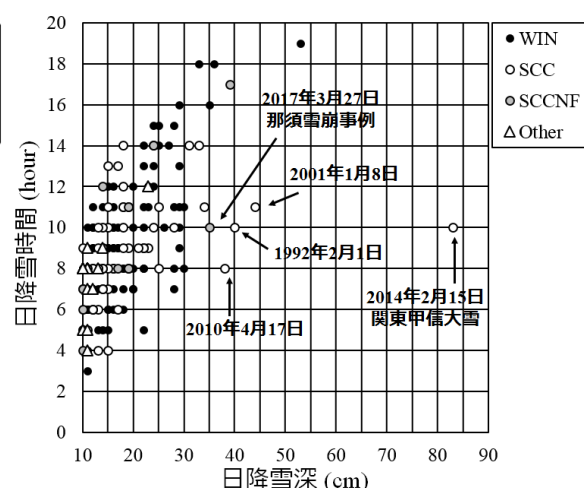


図-6 気圧配置パターン毎の日降雪深と日降雪時間の関係。

3.3 那須における短時間での大雪の環境場

那須における短時間での大雪について考えるため、各事例での降雪深 1cm 以上の時間の総和を日降雪時間とし、日降雪深との関係を調べた（図-6）。その結果、どのパターンでも基本的には日降雪時間が長いほど日降雪深も大きかったが、SCC と SCCNF では日降雪時間が短くても日降雪深の大きい事例が見られた。この特徴は 2014 年 2 月 15 日が顕著であり、他には 2001 年 1 月 8 日、1992 年 2 月 1 日、2010 年 4 月 17 日、そして那須雪崩事例がこれにあたる。

これらの事例の地上天気図を比較したところ、5 事例中 4 事例で前線を伴う低気圧が関東平野に近い海上などを発達しながら通過しており、日最大降雪深を観測した時刻付近で閉塞過程に入っていた（図-7）。いずれの事例でも那須はこの低気圧の北西象限にあたる。閉塞過程の低気圧の北西象限では上空で生成セルが発生し、特に降雪が強まることがある（Colle et al., 2014 など）。仮にこれらの事例でも那須雪崩事例のように Seeder-Feeder メカニズムが働いているのであれば、下層の水蒸気供給による Feeder Cloud の生成に加え、閉塞過程の低気圧中心が那須の南東に位置し、上空に十分な Seeder Cloud が存在することが那須での短時間の大雪に重要である可能性がある。

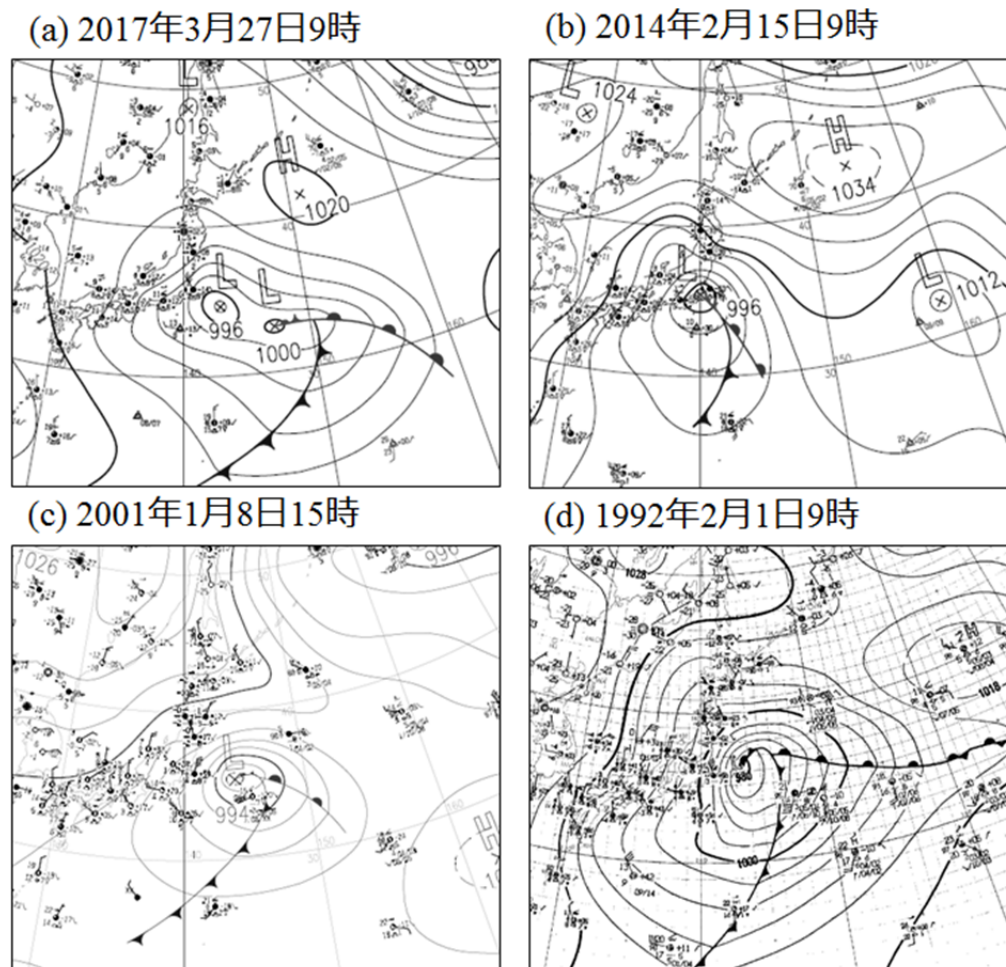


図-7 短時間大雪の発生した事例の地上天気図。

4 結論

本研究では、低気圧の通過に伴って那須で大雪となるときの降雪特性を理解し、表層雪崩発生との関係を把握することを目的として、事例解析と統計解析を行った。その結果、2017 年 3 月 27 日に表層雪崩が発生した大雪事例では、那須では湿潤な北～東風の強まりとともに地形性上昇流が過冷却の水雲を下層で生み、局地的に Seeder-Feeder メカニズムによる降雪の強化が起こっていた。これにより、那須岳の北～東斜面では降雪の集中と短時間での大雪がもたらされたことがわかった。統計解析の結果、この事例と同規模の大雪は約 3 年に 1 度、3 月と

しては約 19 年に 1 度発生していることがわかった。那須で日降雪量が 10cm 以上となる気圧配置は冬型が 63%，低気圧が 30%であり，基本的には日降雪時間が長いほど日降雪深が大きくなった。しかし，低気圧による降雪の場合には例外的に短時間で大雪になる事例が確認され，これらの多くの事例では低気圧が閉塞過程で関東付近を通過していた。

表層雪崩発生に重要な弱層形成は，短時間での多量の降雪だけでなく，どのような降雪結晶がいつどこで降るのかも重要である。本研究で扱った那須雪崩事例で示されたように，地形の影響により降雪結晶の特性も局地的に変化していることが考えられる。しかしながら現状では，降雪結晶の実態把握に必要な観測データが極めて乏しいことから，市民科学による降雪結晶の観測の取り組み（荒木，2018b）などで得られたデータも上手く活用し，関東甲信地方における降雪特性を明らかにしていく必要がある。

本研究では那須における大雪は低気圧よりも冬型の気圧配置時のほうが頻度は高いことが明らかになった。冬型の気圧配置時に日本海上で発達する降雪雲は基本的に積乱雲であり，樹枝状雪片や霰が多く見られる。一方，低気圧に伴う降雪雲では低温型結晶と呼ばれるなだれやすい降雪結晶が多く，表層雪崩のリスクも高いと考えられる。これらのことから，那須で大雪が予想されるとき，冬型の気圧配置ではなく低気圧に伴う降雪現象である場合には，短時間大雪の起こりやすさや降雪結晶の関係から，表層雪崩発生のリスクが高まると考えられる。ただし，大雪が予想される場合には雪崩以外にも見通しの悪化や立ち往生のおそれがあるため，いずれにしても山岳域での活動には留意が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり，首都大学東京の藤部文昭氏と気象研究所の隈健一所長には，極値統計解析について大変有益なアドバイスをいただきました。この場をかりてお礼申し上げます。本研究は，文部科学省科学研究費補助事業「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），「首都圏の高精度雨雪判別手法確立に向けた降雪機構の実態解明」（課題番号：17K14394）の一環として実施したものです。

引用文献

- 荒木健太郎（2018a）：低気圧に伴う那須大雪時の表層雪崩発生に関わる降雪特性。雪氷，80，印刷中。
- 荒木健太郎（2018b）：市民科学による超高密度雪結晶観測「#関東雪結晶プロジェクト」。雪氷，80，印刷中。
- 防災科学技術研究所（2017）：那須町雪崩災害調査（2017.3.28 実施）（速報詳細版）。
http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyu_naiyou/seppyouaigai/2017/report_20170328_NasuOnsen.pdf
（2018.02.27 閲覧）
- Browning, K. A. (1990): Organization of clouds and precipitation in extratropical cyclones. Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 129-153.
- Colle, B. A., Stark, D. and Yuter, S. E. (2014): Surface microphysical observations within East Coast winter storms on Long Island, New York. Mon. Wea. Rev., 142, 3126-3146.
- Houze, R. A. (2012): Orographic effects on precipitating clouds. Rev. Geophys., 50, RG1001.
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K. (2015): The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. J. Meteor. Soc. Japan, 93, 5-48.
- Saito, K., Fujita, T., Yamada, Y., Ishida, J., Kumagai, Y., Aranami, K., Ohmori, S., Nagasawa, R., Kumagai, S., Muroi, C., Kato, T., Eito H. and Yamazaki, Y. (2006): The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. Mon. Wea. Rev., 134, 1266-1298.

MP レーダー解析による 2017 年 3 月 26-27 日那須近辺における降水と風の分布 MP Radar analysis of the distribution of the wind and precipitation around Nasu area on March 26-27, 2017

中井 専人¹⁾, 清水 慎吾²⁾, 前坂 剛²⁾, 岩波 越²⁾, 木枝 香織²⁾
S. Nakai¹⁾, S. Shimizu²⁾, T. Maesaka²⁾, K. Iwanami²⁾, K. Kieda²⁾

¹⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究センター

¹⁾*Snow and Ice Research Center, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

²⁾防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門

²⁾*Storm, Flood and Landslide Research Division, National Research Institute for earth Science and Disaster Resilience*

Abstract: Time series of distribution of snowfall intensity, wind velocity, and hydrometeor are analyzed using the data of X-band multi-parameter (MP) weather radars. Although the radars are at far distances from the location of the avalanche, several characteristics of snowfall were described by applying analysis methods developed in the field of radar meteorology. The volume-velocity processing (VVP) method was used for the wind analysis. Hydrometeor classification algorithm using fuzzy-logic technique was applied to the polarimetric moments observed by the MP radars. A specific period, characterized by weak precipitation intensity, rather uniform reflectivity and wind speed, and small snow/graupel ratio, can be identified. The criteria of these characteristics were decided empirically assuming poorly rimed snowfall forming the weak layer in the snowpack. These characteristics can be clues to judge the formation of possible poorly rimed weak layer of snowpack in conjunction with improved quantitative precipitation estimation. Analysis of three-dimensional structure of wind field and the distribution of each type of hydrometeor is a hopeful method. Radar-modeling cooperative researches will be necessary for the analysis.

Key words: MP radar, VVP, Hydrometeor classification

1 はじめに

2017 年 3 月 27 日に那須温泉ファミリースキー場付近の山岳地(以後「現地」と記述)で発生した災害雪崩については、

- ・ 26 日夕方から 27 日午前中にかけてのこの時期としては稀な大雪による新雪荷重がある状態
- ・ 積雪表面から 17cm~30cm 下の雲粒付着の少ない板状等の降雪結晶の弱層が破壊されて表層雪崩が発生

と推定されている(中村ほか, 2017). このときの弱層となった降雪, 新雪荷重となった降雪の特性を検知できるかどうか, MP レーダーデータを用いた降雪と風の解析を行った.

2 研究方法

2.1 降水量分布と VVP 風解析

国土交通省 X バンド MP レーダー(XRAIN)の極座標低仰角データをもとに, 降水量分布と volume-velocity processing (VVP)による風を解析した. 具体的には, 2 分毎の反射強度とドップラー速度を使用し, 2 変数簡略化 VVP 法(立平・鈴木, 1994; 瀬古, 2010)を用いて上空の風向, 風速を推定した. この手法は, 一定の領域の風ベクトルが一様であると仮定し, 方位角の変化によるドップラー速度値の変化から, 最小二乗法により風速の 2 成分を求めるというものである. 上の仮定のため十数 km 四方程度の領域を必要とするため, 得られる風の分解能は粗くなり, 10km スケールの大まかな分布を見るのに適している.

風速場のほかには、観測データに含まれている 2 分毎の降水強度(mm hour^{-1})を 2 分間継続したものとみなして、積算した降水量(mm)を求めた。風向、風速、降水量はレーダーを中心とした 1km 格子に内挿した。現地近傍では XRAIN 田村レーダーの仰角 1.6° データが最も広い範囲で風を解析できたので、仰角 1.6° の解析結果を示す。雪崩発生地点に近い「天狗岩」は田村レーダーからの距離約 62.5km であり、この近傍における仰角 1.6° のビーム中心は海面高度約 2500m 、すなわち現地上空約 1000m である。

2.2 降雪粒子判別

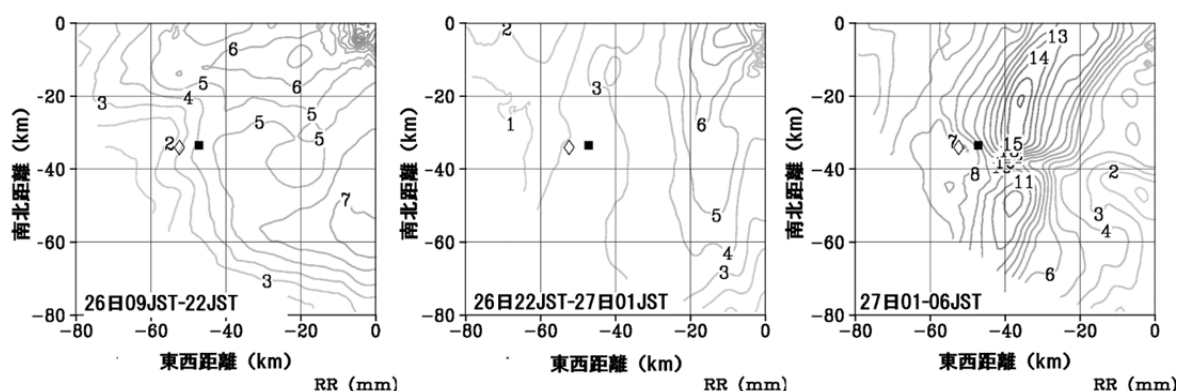
XRAIN の極座標全仰角データを用いて、Kouketsu et al. (2015)に準拠した降雪粒子判別(HC)を行った。このとき前処理として、Zh と Zdr については雨観測データ(7 事例)を用いたバイアス補正、 ρ_{HV} については SNR などを用いた補正とフィルタリング、KDP については異常値の除去を行った。現地近傍を解析可能なレーダーとして氏家、田村の 2 サイトを検討したが、田村レーダーではバイアス補正に用いたデータの期間と本研究の対象とする解析期間の間でバイアス値が同一ではなかったため、氏家レーダーについてのみ解析を行った。直交座標への変換には Cressman 内挿を使用し、緯度経度座標系(「2 分の 1 地域メッシュ」、約 500m 分解能)に 5 分毎の値を出力した。

3 結果

3.1 積算降水量分布

仰角 1.6° の降水量分布をアニメーションにしたところ、期間Ⅰ：26 日には北西－南東走向のバンド構造が見られるなど様々な変化をする期間、期間Ⅱ：日付が変わる前後約 2-3 時間、現地上空が比較的一様な弱い降水域となりその東側に降水強化が見られた期間、期間Ⅲ：その後、現地上空にやや強い降水域が停滞した期間、という特徴的な変化が見られた。それぞれの期間について積算降水量を求めたものが図－1 である。

期間Ⅰにおいては現地から東方にかけて全体的に降水が分布し、特徴的なパターンは見られない。スナップショットで見られたバンド構造は停滞しておらず、レーダー観測範囲を次々と通過していた。積算である図－1 左で特に降水の集中が見られないのはそのためと考えられる(図－1 左)。期間Ⅱにおいては現地上空の降水量は少なくかつ分布が一様である一方、その東側 $30\sim 40\text{km}$ (標高 500m 線付近)に降水が集中していた(図－1 中)。期間Ⅲでは約 5 時間にわたって、現地上空すぐ東側の降水量が多かった(図－1 右)。鉛直断面を取ると、この強い降水域は高度が下がるほど西に中心があるように傾いていたこと、かつ高度が下がるほど降水が強く



図－1 2017年3月(左)26日09JSTから22JSTまで、(中)26日22JSTから27日01JSTまで、(右)27日01JSTから06JSTまでの、仰角 1.6° の積算上空降水量分布。図の範囲はレーダーを原点とした東西、南北距離の座標系のレーダー南西象限である。陰影はレーダー反射因子(dBZ)、等値線は標高を表す。◇と■はそれぞれ現地とアメダス那須高原を示す。レーダーから距離 80km までが観測範囲である。

なっていたことがわかる(図-2)．期間Ⅲの強い降水域は同じ場所に停滞しており，降雪粒子が風に流されながら成長し，現地近傍に強い降水をもたらし続けていたと考えられる．

3.2 VVP 解析

VVP 解析によると，26 日午後の降り始めは西風であったが，夕方頃から，現地西側などに西風が残りながらも全体的には南東～南の風に置き換わり(図-3 左)，特に 26 日 21 時ごろからは南東風が卓越する傾向となった．その後 27 日 0 時ごろにかけて現地上空はかなり一様な南東風の間となった(図-3 中)．27 日 1 時ごろから降水の強まりとともに風速が増加し，5 時 30 分ごろから北東風の領域が広がったが，この間，現地付近の風はあまり一様ではなく，収束が見られることが多かった(図-3 右)．現地上空では 6 時ごろに南成分の風が北東風に置き換わった後，北北西へと変化し風速はさらに強くなった．雲粒無し結晶の降雪による弱層が形成された時間帯は，雪崩発生よりかなり以前のはずであり，上空の風速は雪崩発生時刻より弱く，風向も大きく異なっていたと考えられる．

降水強度と風の間について，時系列を解析した．VVP 解析値から現地近傍の値を求めたところ，反射強度は 27 日 0 時頃までは 15dBZ-20dBZ，0 時以降はほぼ 20dBZ 以上と明瞭な差があった．平均風速は 26 日 13 時から 21 時ごろまでが 5 m s^{-1} 以下と弱く，22 時以降は $5-10 \text{ m s}^{-1}$ ，27 日 7 時以降は 10 m s^{-1} と強い風になっていた(図-4)．

特徴的だったのは風速のテクスチャである．テクスチャとは画像処理の分野で 2 次元的な

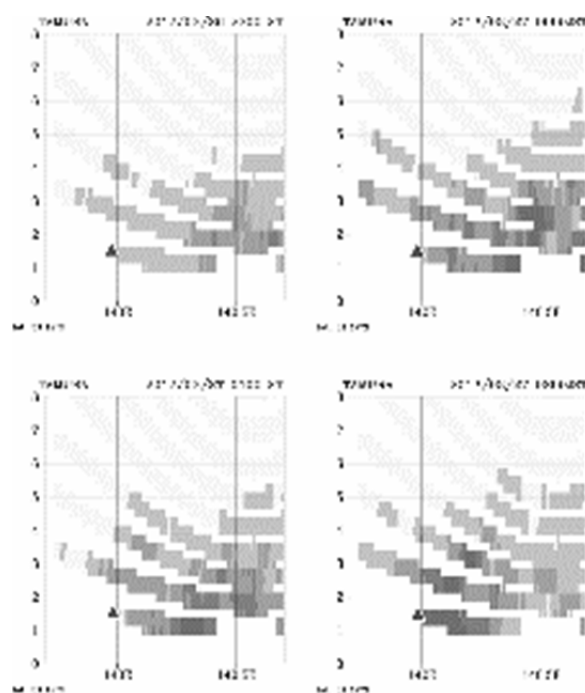


図-2 現地上空を通る東西鉛直断面．降水強度を強いほど濃い色で示す．最も薄い色は無降水，白はデータの無い領域である．仰角間隔に対して内挿の度合いを控えめにしているため，仰角の間にギャップがある．天狗岩の位置を▲で示す．

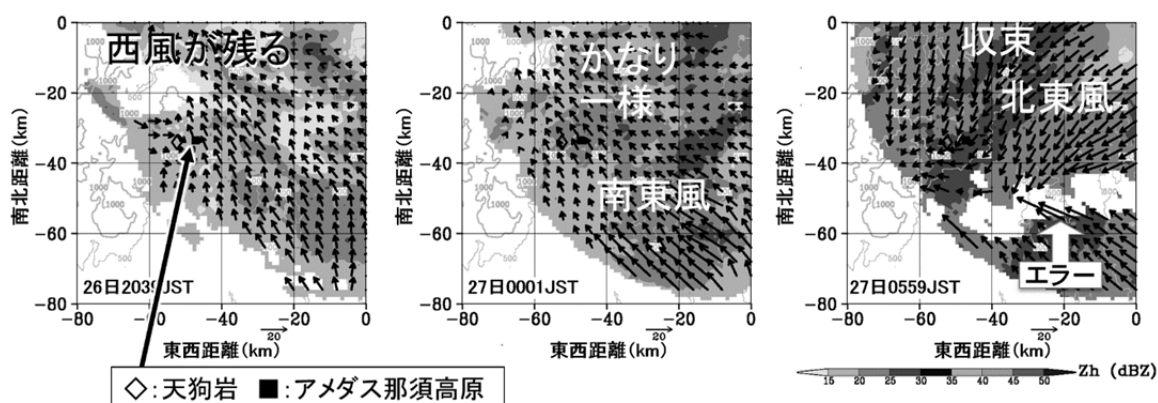


図-3 簡略化 VVP 法で求めた田村レーダー仰角 1.6 度の風ベクトルの分布．図の範囲や記号等は図-1 に同じ．各格子点を中心とする 5x5 格子全てが 0dBZ 以上の点のみ風をプロットしている．

分布や模様の特徴を広く意味する用語であるが、ここでは、Ruiz et al. (2015)等で用いられている隣の格子との値の差の二乗平均平方根(Kessinger et al., 2003)を特徴量として「テクスチャ」と呼ぶことにする。Kessinger et al. (2003)の方法は極座標レーダーデータのレンジ方向についてのみ値の差を計算するが、ここでは東西方向、南北方向の両方について計算したものの平均を用いた。風速のテクスチャはこの計算を風の東西成分、南北成分それぞれについて行った値を平均して求めた。

風速のテクスチャは26日21時30分から27日1時までの間(図-4のA)、非常に小さい状態が安定して継続し、現地付近上空の風速分布が一様であったことを示している。また、この時間帯の中で23時から23時30分の間、一時的に反射強度のテクスチャも小さくなり、反射強度、風速の両方が現地上空を中心とした20km四方で非常に一様であった。27日6時から8時半にかけても風速のテクスチャは非常に小さいが、仮に $Z_h < 20$ dBZ, 風速テクスチャ < 2 m s^{-1} , 風速 < 10 m s^{-1} という条件で“降水と風が比較的弱く一様な期間”を抽出すると、期間Aが抽出され、その中でZhのテクスチャ < 2 dBZの期間が、特にZhの一様性が高い期間となる。ただし、図-4のCの期間も抽出される。

3.3 降雪粒子判別

氏家レーダーデータを用いたHCの結果について水平、鉛直断面を作図して概観したところ、現地近傍では氷晶、乾雪が多く分布し、その中に乾き霰が少し混じっていた(図略)。湿雪、湿り霰、雨滴などは、レーダー近傍や南方の関東平野には多く解析されたが、現地近傍ではほとんど見られなかった。そこで、VVP解析と同様に現地近傍20km四方、かつ高度幅1500mから2500mの領域を取り、その中で10%以上の格子に降水がある時刻について、判別された各粒子ごとの格子数を求めた。10%というしきい値は観測後半の欠けが大体無くなることを目安としており、値が小さいのは無降水域やビームブロックによる観測のない格子も含むためである。

降り始めから27日1時ごろまでは冠雪と氷晶の格子数がほぼ同数で、乾き霰の格子数がそれより一桁少ない状態が続いた。1時以降は氷晶と判別された領域が多くなり、降水の強い時間帯に対応して一時的に乾き霰の格子数が増加した(図-5)。27日に氷晶格子が多かったことから、氷晶という分類は明らかにこの事例に関しては雲粒なしとの対応はつけられない。一方、乾雪と乾き霰の比率(本稿では雪霰比と呼ぶ。)は一時的にその値が0.1以下で

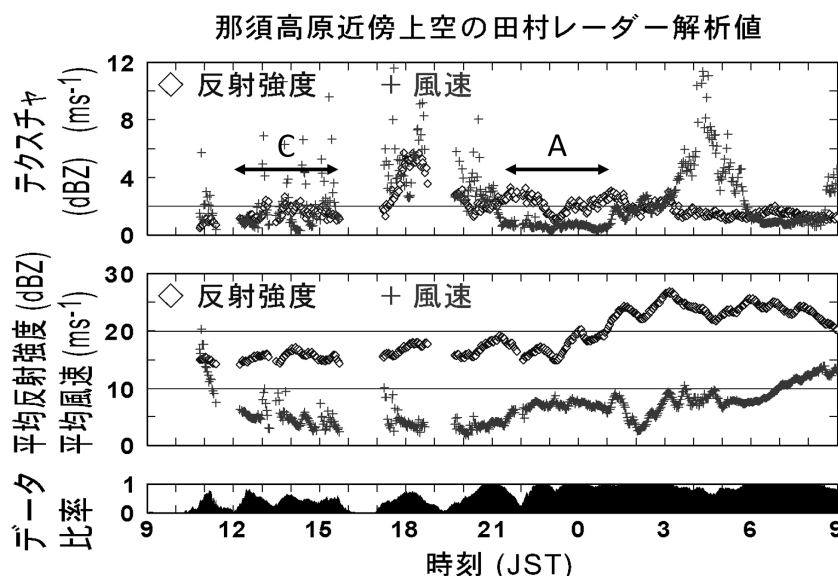
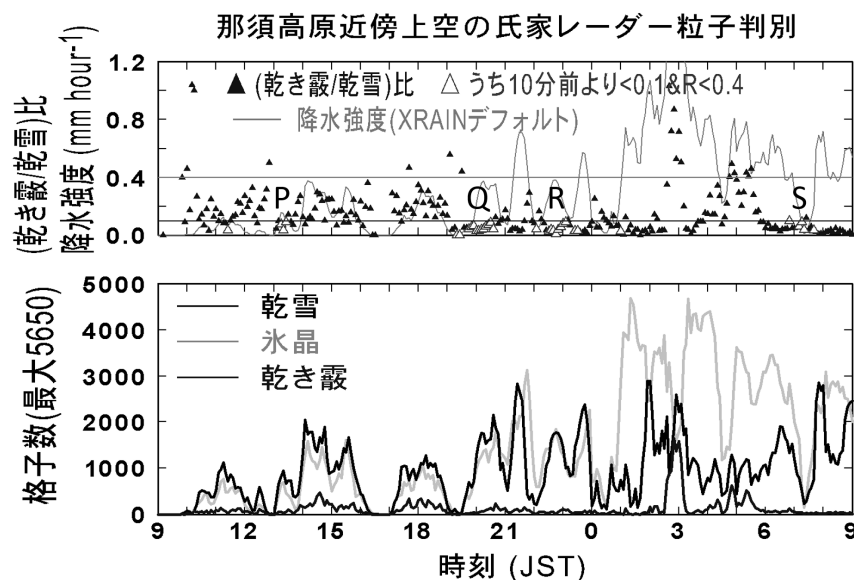


図-4 田村レーダーVVP解析値より求めた、那須高原近傍上空の20km四方(21x21格子)のうち観測値あり格子数(データ比率)が33%以上を有効として求めた平均反射強度(dBZ), ベクトル平均風速(m s^{-1}), 反射強度と風速のテクスチャの時系列。図中C, Aについては本文参照。

安定することがあり、雪霰比が 10 分前から継続して <0.1 ，かつ降水強度 0.4 mm hour^{-1} 以下，という条件を用いると，図－5 の P，Q，R，S の 4 期間が抽出された。

このうち期間 R(26 日 22 時～23 時 30 分)は図－4 の期間 A に含まれている。このことは，期間 R が，降雪が弱く，降雪強度も風の場合も同様，雪霰比が小さいという条件を安定して満たしており，雲粒が少なく弱層となる積雪層の形成に対応することを示唆する。図－5 の期間 P も同じ条件を満たすが，時間が短くまた弱層形成時と考えるには時間的に早すぎる。



図－5 氏家レーダーデータを用いた降水粒子判別より求めた，那須高原近傍上空の約 20km 四方，高度 1500m から 2500m の領域内における，氷晶，乾雪，乾き霰の格子数(下)，及び，乾き霰と乾雪の比(雪霰比)と降水強度(上)．雪霰比のうち赤で示したのは雲粒付着の少ない弱い降水を想定した条件で抽出したもの．本文参照。

4 考察とまとめ

VVP 解析による風の場合，降水強度，偏波パラメーターを用いた粒子分類を併用し，現地近傍の降水と風の場合の時系列を解析した。その結果，降水強度が弱く，反射強度と風速が同様，かつ雪霰比が小さいという条件で，特定の期間を抽出可能なが分かった。今回抽出された 26 日 22 時～23 時 30 分という期間は，表層雪崩の弱層となった雲粒付着の少ない降雪に対応することが示唆される。

この期間を中心とした期間Ⅱの降雪と風の分布の特徴は，現地東側 30～40km の標高約 500m 付近に比較的強い降水域が停滞し，その西側の弱く一般的な降水域であったこと，及び，レーダー観測高度においても弱く非常に一般的な南東風の場合であったことである。抽出された期間の継続時間は 1 時間 30 分と短く，低気圧からの風の変化と地形の影響などにより，現地付近に形成された数十 km スケールの降水系の構造が特に雲粒付着の少ない降雪粒子を成長させることに寄与したものと考えている。

上記の期間はしきい値を決めることにより抽出されたが，現状そのしきい値は経験的に決めたものであり，今後の事例の積み重ねによって，もっと一般的な条件で雲粒付着の少ない降雪域を特定できるようにすることが望ましい。そのためには，今回の事例に対しても，弱層となった雲粒付着の少ない降雪の時間帯，そのような降雪がもたらされたプロセスについて，他の研究と結果との比較も含めて，さらに解析を進める必要がある。

弱層形成後の新雪荷重となった降雪については，期間Ⅲの降雪が対応するものと考えている。この期間には東に傾いた強い降雪域が現地上空に移動，停滞し，下層ほど降雪が強くなる構造を保ちながら現地付近に強い降雪をもたらしていた。この降水系も停滞する特徴を持って

おり、地形の影響でどこにこのような雪雲が停滞するかが、そのプロセスの解明と予測につなげることが今後の課題である。

弱層となる降雪、新雪荷重となる降雪のいずれについても、低気圧の時間変化の中で形成された停滞性の強い降雪域が存在していた。そのスケールは数十 km 程度である。そのような降雪域の形成条件、ひいては一般的に弱層となり得る降雪がもたらされる過程を明らかにするためには、降雪粒子分布と気流の 3 次元的な特徴を把握する必要がある。図-6 はそれを試行した例である。このような、レーダー解析とモデリングを併用した研究を今後進展させて行くことが必要と考えられる。

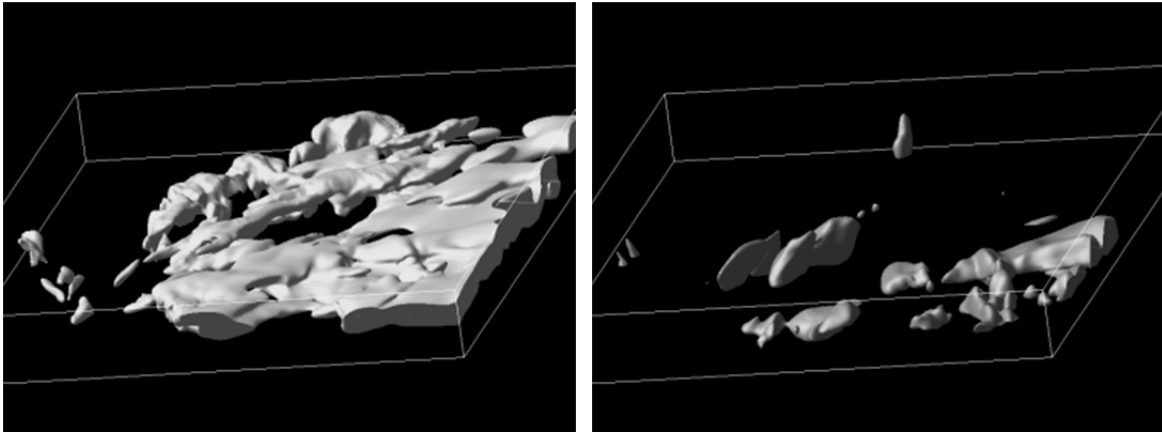


図-6 レーダー観測された風を数値気象モデル CReSS(Tsuboki and Sakakibara, 2007)に同化させて求めた(左)雪と(右)霰の 3 次元分布の例。等値面は 0.5 g kg^{-1} 。レーダーデータを用いた粒子判別による雪、霰と数値モデルで定義されるそれらとの比較など、今後の研究を必要とする部分は多い。

謝辞

降雪粒子分類にあたっては、日本気象協会の板戸昌子、増田有俊の両氏にお世話になりました。利用した XRAIN データは国土交通省より提供されたもので、DIAS の枠組みによるものです。

引用文献

- Kessinger, C., S. Ellis, and J. Van Andel, 2003: The Radar Echo Classifier: A Fuzzy Logic Algorithm for the WSR-88D. 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science, P1.6. (<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/54946.pdf>, 2018 年 2 月 24 日確認)
- Kouketsu, T., H. Uyeda, T. Ohigashi, M. Oue, H. Takeuchi, T. Shinoda, K. Tsuboki, M. Kubo, and K. Muramoto, 2015: A hydrometeor classification method for X-Band polarimetric radar: Construction and validation focusing on solid hydrometeors under moist environments. J. Atmos. Ocean. Technol., 32, 2052–2074, doi:10.1175/JTECH-D-14-00124.1.
- 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 24 日確認)
- Ruiz, J. J., T. Miyoshi, S. Satoh, and T. Ushio, 2015: A quality control algorithm for the Osaka phased array weather radar. SOLA, 11, 48–51, doi:<https://doi.org/10.2151/sola.2015-011>.
- 瀬古弘, 2010: 中緯度のメソ β スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究. 気象庁研究時報, 62, 1-74.
- 立平良三・鈴木修, 1994: 単一ドップラーレーダーによる上層風推定の精度. 天気, 41, 761-764.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2007: Numerical prediction of high-impact weather systems. The Textbook for Seventeenth IHP Training Course in 2007, 281pp.

降雪による弱層形成に関する数値気象モデルを用いた再現実験 Numerical weather simulation addressing weak layer formation due to heavy snowfall

橋本 明弘¹⁾, 本吉 弘岐²⁾, 山口 悟²⁾, 中井 専人²⁾
A. Hashimoto¹⁾, H. Motoyoshi²⁾, S. Yamaguchi²⁾, S. Nakai²⁾

¹⁾気象庁 気象研究所

¹⁾ *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency*

²⁾防災科学技術研究所 雪氷防災研究部門

²⁾ *Snow and Ice Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience*

Abstract: From March 26 to 28, 2017, a developing cyclone passing the south coast of Japan brought heavy snowfall over mountain areas in the Pacific side of Japan. During this snowfall event, an avalanche disaster occurred killing or injuring tens of people on March 27. According to the reports from the urgent in-situ snow pit survey conducted on the next day, this avalanche was classified as a dry snow surface avalanche. The weak layer identified at the vicinity of the avalanche site in Nasu town was composed of weakly rimed planar crystals, in contrast to the upper and lower layers which were composed of more rimed crystals. In this case, characteristics of falling snow crystals were a strong factor for the occurrence of the avalanche.

In order to simulate a transition of characteristics of falling snow crystals during this snowfall event, the authors have introduced a new scheme to the microphysical module of the Japan Meteorological Agency's Non-Hydrostatic Model (JMA-NHM) to diagnose the crystal features. The new model is able to provide information about the mass ratio of different crystal shapes and accreted droplets to the total mass of snow crystals. As a result of numerical experiments, riming ratio drastically decreases in the midnight of March 26, at the avalanche site, as is expected based on the snow pit survey. The drastic changes in the microphysical feature of snowfall occur within half of a day as the cyclone passes.

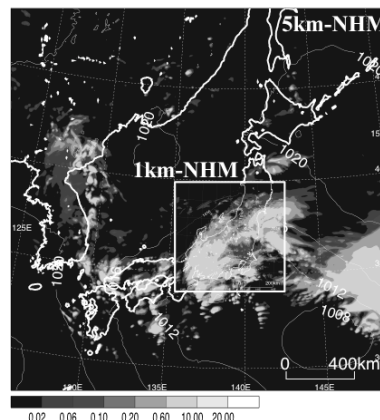
Key words: Snow avalanche, Snow crystal, Riming, Cloud microphysics, Numerical weather prediction model

1 はじめに

表層雪崩発生要因の一つである積雪内部の弱層の形成に降雪粒子の性状が深く関わっている場合、降雪粒子の雲粒付着の度合いや結晶形といった物理特性が、弱層の同定や予測可能性において重要な因子となる。そのため、積雪内部の弱層形成前後の気象条件の特徴に関する解析が数値気象モデルを用いて行われている(中村ほか, 2013)。しかし、従来の気象モデルは、降雪粒子の形状や雲粒付着の度合いを陽に表現し得ないため、大気中での雲・降水形成から積雪内部の弱層形成に至る一連の物理的関連を描き出すには至っていない。そこで、降雪粒子の雲粒付着の度合いや結晶形といった物理特性を診断できるよう数値気象モデル(JMA-NHM)

表－1 雲氷・雪・霰それぞれの温度域別昇華成長量と雲粒捕捉成長量を表す変数.

	Cloud ice	Snow	Graupel
Accretion	Qiacc	Qsacc	Qgacc
Deposition -4<T<0 C	Qidep-0	Qsdep-0	Qgdep-0
Deposition -10<T<-4 C	Qidep-4	Qsdep-4	Qgdep-4
Deposition -20<T<-10 C	Qidep-10	Qsdep-10	Qgdep-10
Deposition -36<T<-20 C	Qidep-20	Qsdep-20	Qgdep-20
Deposition T<-36 C	Qidep-36	Qsdep-36	Qgdep-36



図－1 5km-NHM と 1km-NHM の計算領域および 2017 年 3 月 26 日 23JST の鉛直積分氷水量(mm).

を改良し，降雪・積雪を含めた総合的視野から降雪による弱層形成に迫るための新しい研究手法として応用できるようにした．この手法を用いて，2017 年 3 月 27 日に那須町で発生した雪崩災害時の気象再現実験を行い，弱層形成メカニズムについて気象学的観点から検討した．

2 数値モデル

JMA-NHM の雲物理過程は，大気中の氷粒子を雲氷・雪・霰の 3 クラスに分け，それぞれの総混合比・総数濃度・地上降水量等によって，大気中の降雪粒子の分布や地上降雪量を予測する．そのため，モデルが表現できる氷粒子のタイプは高々 3 つであり，実際の降雪中に観測される多様な粒子タイプに着目した議論に用いるには限界があった．これを克服するために，雲氷・雪・霰それぞれの温度別昇華成長量および雲粒捕捉成長量を新たな予報変数として組み込んだ（表 1），粒子密度や形状に密接に関わる素過程別の粒子成長量を，粒子の生成から降水を経て地上に至るまで追跡できるようにした．氷晶の成長モードが温度に応じて変化することを考慮すると（0～-4℃：角板，-4～-10℃：針・角柱，-10～-20℃：角板・樹枝，-20～-36℃：角柱，-36℃未満：砲弾集合・不規則等），氷粒子の質量に対する温度別昇華成長量の比は，粒子形状を表すパラメータと見なすことができる．

3 数値実験

日本を中心とする水平 2250km×2250km，鉛直約 22km の計算領域を設け，水平格子幅は 5km，鉛直方向には最下層で 40 - 最上層で 735m の可変格子として数値実験を行った（図 1, 5km-NHM）．タイムステップ長は 15 秒，積分時間は 45 時間とし，初期値・境界値には気象庁メソ解析を用いた．さらに 5km-NHM の計算結果を初期値・境界値として，関東甲信地方を中心とする 650km×650km の計算領域を設け，水平解像度 1km，鉛直層は 5km-NHM と同じ設定で実験を行った（図 1, 1km-NHM）．タイムステップ長は 4 秒，積分時間は 30 時間とした．実験対象期間は 2017 年 3 月 25 日 21 時～29 日 21 時（JST）とし，初期時刻を 12 時間ずつずらしながら 8 回の数値実験を行った．

4 結果

図 2, 3 は，栃木県内の地上気象観測データと数値実験結果を比較した結果である．那須高原（標高 749m，図 2a），大丸（標高 1268m，図 2b），中宮祠（標高 1295m，図 2h），湯元（標高 1484m，図 3a）の標高の高い各地点で，1km-NHM は観測された降水量の推移を比較的によく再現していた．一方，清滝，（標高 741m，図 2g），中塩原（標高 604m，図 3b），芦野（標高 252m，図 3c）では，実際には観測されていない 26 日の降水をモデルは予測していた．ただし，測定 の 最小単位に満たない程度の弱い降水があった可能性もあるため，再現性の判定は

難しい。26日から27日にかけての降雪イベントの間、1km-NHMは実際の地上気温を良く再現していた(図2d, 2e, 2f, 2i, 2j)。図4は1km-NHMの結果で、雪崩地点を含むモデル格子の気象パラメータの推移を表している。25日は降水がほとんどなく(図4a)、日中の短波放射(図略)で雪温が上昇しており(図4b)、3月28日に実施された現地調査(http://www.bosai.go.jp/saigai/2016/pdf/20170331_01.pdf)で確認されたざらめ雪層(積雪表面から35-37cm)の形成と整合的であった。図4aを詳しく見ると、雲粒捕捉成長(Psacc)の寄与率は、26日21~24時(JST)の間小さいが、その後、急激に増加していた。26日21時以前の時間帯でも、ある程度の寄与(Psacc)が認められ、26日21~24時の降雪粒子は、前後の時間帯とは対照的な特徴を示していた。現地調査では、積雪面から23.5cm下に雲粒付着の少ない板状結晶からなる弱層が認められており、雲粒捕捉成長の寄与という観点では、数値実験の結果は実際の積雪状態をよく再現していた。一方、雪結晶の形状は、現地調査では弱層中に板状結晶が認められたが、数値実験結果は、柱状結晶の寄与が大きいことを表しており観測結果とは異なっていた。雲粒捕捉成長の寄与は対流圏中層・上層で常に小さく、高度2km未満のごく下層で、時間とともに増減していた(図略)。このことは、弱層形成の要因となった雪結晶の雲粒捕捉成長寄与率の時間変化が、地形性上昇流による雲粒生成の強弱に起因することを示している。

図5は、那須高原(気象庁アメダス)地点における風速と風向の観測値(黒)と1km-NHMの結果(灰色)である。雲粒捕捉成長の寄与が低下した26日21~24時を含む数時間は、観測・数値実験ともに風が弱まっていた(図5矢印)。風向は、この時間帯に、南寄りから北寄りに変化していた。26日午後から27日にかけて低気圧が関東南岸を発達しながら通過したことを

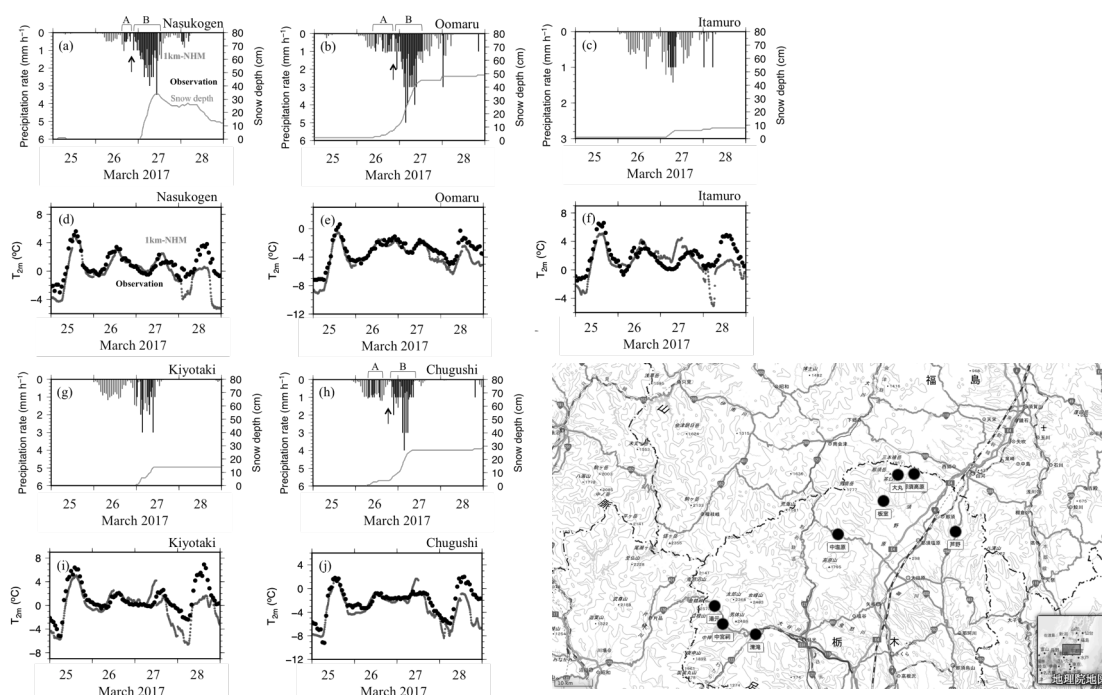


図-2 那須高原、大丸、板室、清滝、中宮祠における降水量・地上気温の観測結果と数値実験結果。黒は観測値。灰色は1km-NHMの結果。(a)(b)(c)(g)(h)の薄灰色実線は積雪深観測値。

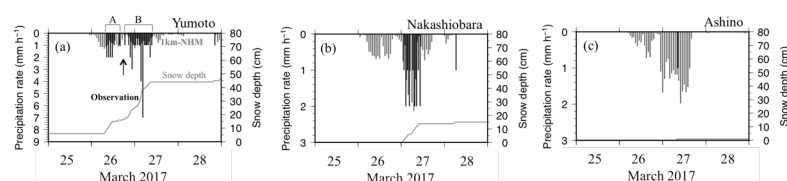


図-3 湯元、中塩原、芦野における降水量の観測結果と数値実験結果。黒は観測値。灰色は1km-NHMの結果。薄灰色実線は積雪深観測値。

考慮すると、この風向変化は総観規模の気圧パターンの変化によって生じたと見なせる。図 6 は、雪崩地点上空の固体および液体の水粒子の総水混合比である。前後の時間帯に比べて、26 日 21~24 時の間の総水混合比は小さくなっていた。この時、鉛直積分雲水量 (LWP) も減少していた (図 4c 矢印)。標高の高い那須高原 (標高 749m, 図 2a), 大丸 (標高 1268m, 図 2b), 中宮祠 (標高 1295m, 図 2h), 湯元 (標高 1484m, 図 3a) の降水量の推移を見ると、観測・数値実験ともに、この時間帯に降水量は減少していた (各図矢印)。

5 考察

前節で示したように、観測結果と数値実験結果を比較したところ、雪崩地点の降雪粒子の微物理的特性に関して、数値モデルが予測した結晶形は観測結果と異なっていたものの、降雪結晶の雲粒付きの時間変化がよく再現されていた。また、周辺地域の観測点における降雪量の時間変化については、標高の高い地点では良く再現されていた。さらに、比較的標高の高い那

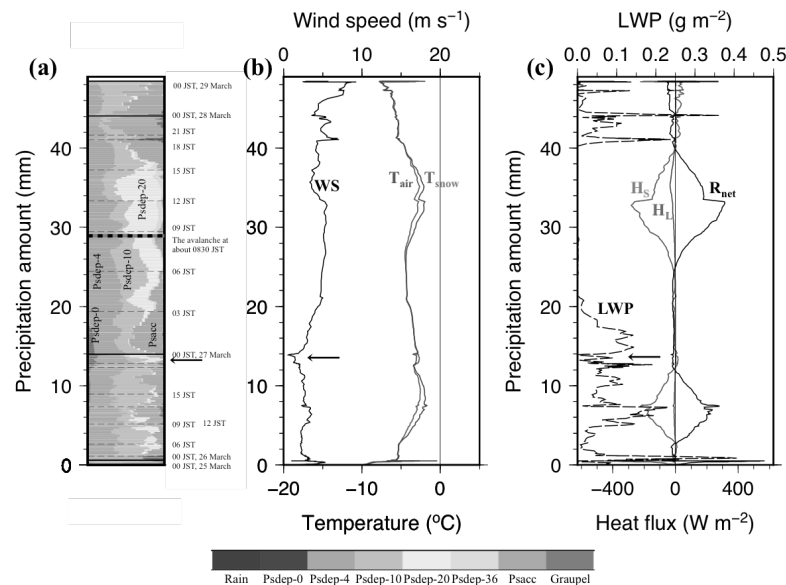


図-4 雪崩地点を含むモデル格子の気象パラメータを、2017年3月25日00JST以降の10分毎積算降水量積算降水量の関数として表記した層位図。(a) 雨滴(Rain)と霰(Graupel)の混合比と、雪粒子の素過程別成長量の寄与率。Psdep-nは温度別昇華生長量の寄与率 (Psdep-0: 0~ -4°C , Psdep-4: $-4\sim-10^{\circ}\text{C}$, Psdep-10: $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$, Psdep-20: $-20\sim-36^{\circ}\text{C}$, Psdep-36: -36°C 以下) を表す。Psaccは雲粒捕捉成長量の寄与率を表す。実線は日界、破線は3時間毎の時刻を表す。太破線は、現地調査の結果から推定された雪崩発生時刻 (27日0830JST)。(b) 地上風速(WS), 気温(T_{air}), 雪温(T_{snow})。 (c) 雪面での顕熱フラックス(H_s), 潜熱フラックス(H_L), 正味放射フラックス(R_{net}), 鉛直積分雲水量(LWP)。

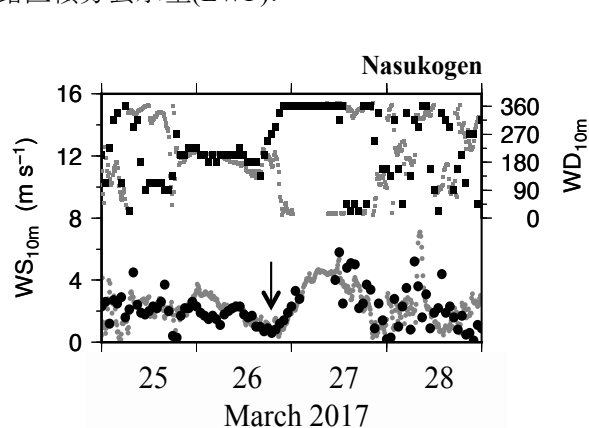


図-5 那須高原の風速 (WS) と風向 (WD)。黒は観測値。灰色は1km-NHMの結果。

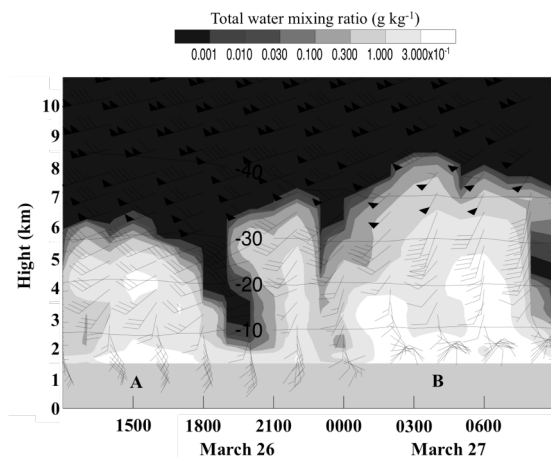


図-6 雪崩地点上空の総水混合比時間-高度断面図。矢羽は水平風。

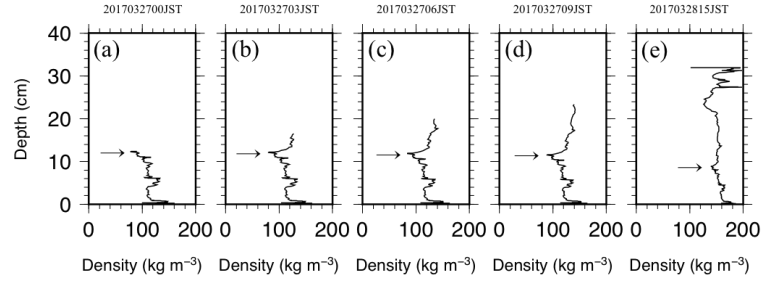


図-7 圧密過程のみ考慮した積雪密度の計算結果.

須高原地点の風向・風速の推移を数値モデルは良く再現していた．これらのことから，数値モデルの再現性は一部不完全であるものの，水平風に対する地形効果による上昇流の発生，上昇流にともなう断熱凝結による雲粒生成，雪粒子の雲粒捕捉成長と雪崩地点の降雪量への寄与という一連の物理過程については，本質を捉えていると考える．

標高の高い観測点における降水量が 26 日夜に一時的に減少していた点と（図 2a, 2b, 2h, 3a の矢印），これと同期して風速が極小を示すとともに風向が南寄りから北寄りに変化した点に着目すると（図 5），この時間帯を境に，2 つの異なる降水システムが前後して那須岳に降雪をもたらしたと推定できる（図 2a, 2b, 2h, 3a の A, B）．数値実験から得られた上空の雲・降水粒子の時間変化を見ると，これらに対応した降水システムがみとめられる（図 6 の A, B）．降水システム A は，雲頂が低いものの，総水混合比は高度 2km 以下のごく下層で大きな値を示している．降水システム A の通過後、降水システム B が差し掛かるまでの時間帯（26 日 18-24 時）は，降雪量は少なく，雲粒の寄与の比較的小さい時間帯を含んでいる．降水システム B は A よりも雲頂高度が高く，27 日朝にかけて，総水混合比がより大きな値を示すとともに，多量の降雪をもたらしている．このことは，南岸低気圧の通過に伴うシステムチックな状況変化の中で起きた降雪イベントで，弱層形成につながる降雪量および粒子特性の劇的な変化が，およそ半日程度の短い間に起きたことを表している．この点は，雪崩リスク評価・予測の観点から注目すべき重要な知見である．

ここまでは，降雪の粒子特性の変化と弱層との関係について，気象学的観点から考察を加えてきた．次に，数値気象モデルから得られた降雪粒子特性の時間的遷移の特徴が，積雪密度等の積雪パラメータにどの程度影響を与え得るのかについて考察する．本来，積雪内部で起きる熱や水蒸気の伝搬・相変化・力学的変性等全ての物理過程を考慮すべきだが，簡単のため，圧密過程のみを考慮した簡易な計算を行う．今注目している 26 日から 27 日にかけての降雪イベントの間，積雪層の温度は融解が起きない十分低い温度に保たれていたと推定できるため，1 日程度の短時間に限っては許容可能な近似解が得られると考える．福田ほか(2000)に従い，積雪密度 ρ に次の式を適用した．

$$\rho = \left[\frac{n}{C} \cos^2 \theta \int_{t_1}^t W dt + \rho_{init}^n \right]^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

ここで， $C = 0.392 \text{ Pa s}$ ， $n = 4.0$ ， W は積雪内部の層に対する上載荷重である．傾斜角は $\theta = 30^\circ$ とした．新雪初期密度 ρ_{init} は，1 km・NHM から出力された降雪量に対する温度別昇華成長量・雲粒捕捉生長量・霰粒子質量の各寄与率 $r_{sdep-0}, r_{sdep-4}, r_{sdep-10}, r_{sdep-20}, r_{sdep-36}, r_{accr}, r_g$ と各成分の密度 $\rho_{sdep-0}, \rho_{sdep-4}, \rho_{sdep-10}, \rho_{sdep-20}, \rho_{sdep-36}, \rho_{accr}, \rho_g$ ，及び，地上風速 WS を用いて，次のように定式化した．

$$\rho_{init} = r_{sdep-0} \rho_{sdep-0} + r_{sdep-4} \rho_{sdep-4} + r_{sdep-10} \rho_{sdep-10} + r_{sdep-20} \rho_{sdep-20} + r_{sdep-36} \rho_{sdep-36} + r_{accr} \rho_{accr} + r_g \rho_g + 13.0 \times WS \quad (2)$$

各成分の密度は次のように与えた．

$$\rho_{sdep-0} = \rho_{sdep-4} = \rho_{sdep-10} = \rho_{sdep-20} = \rho_{sdep-36} = 70 \text{ kg m}^{-3}, \quad (3)$$

$$\rho_{accr} = 100 \text{ kg m}^{-3}, \quad (4)$$

$$\rho_g = 120 \text{ kg m}^{-3}. \quad (5)$$

いくつかの先行研究で、粒子タイプ別に新雪密度の推定式が提案されているが(梶川ほか, 2004, 2005), 数値気象モデルが表現する粒子特性に対応づけるには、さらに多様な粒子タイプに関する推定式が必要である。

図 7 は、式(1)から求めた雪崩地点における積雪密度プロファイルである。雲粒付きの少ない粒子が降っていた 27 日 00 時 (図 4a) には、雪面の新雪密度は約 80 kg m^{-3} と小さな値を示し (図 7a), その後、雲粒の寄与が大きい粒子が降っていた 27 日 03 時 (図 4a) には、雪面近くで約 120 kg m^{-3} (図 7b), 弱層にあたる層は約 80 kg m^{-3} のままだった。この層は、雪崩発生推定時刻 (08:30 頃) に近い 27 日 09 時の時点で、依然、上下の層より小さい密度を保っていた (図 7d の矢印)。現地調査が行われた翌日 28 日 (15 時) になると、上下の層に対するコントラストは弱くなっていた。弱層形成に関する厳密な議論には、積雪内部の物理過程を網羅した積雪モデルの適用が必要だが、この結果は、数値気象モデルの出力する粒子情報が、積雪内部の弱層形成ポテンシャルをある程度表現し得ることを示している。

6 結論

温度別昇華成長量および雲粒捕捉成長量を新たな予報変数として組み込んだ新しい数値気象モデルを用いて、2017 年 3 月 27 日に那須町で発生した雪崩災害時の気象再現実験を行った。雲・降水に関わる素過程や温度・湿度条件が粒子密度や晶癖の形成に強く関与していることから、新しいモデルを用いることで、降雪粒子の物理特性を従来よりも遥かに精緻な形で診断できる。

数値実験結果をもとに雪崩災害前後の降雪粒子特性を調べたところ、今回の雪崩災害の背景的要因となった弱層形成には、26 日夜から 27 日朝にかけて、南岸低気圧の通過に伴う気象場の変化に応じて現れた二つの降水システムによる降雪とその合間の時間帯の降雪の特徴の違いが影響していた。26 日夜に現れた降水システムは、極端に多量の降雪をもたらすことは無かったが、地形性上昇流による雲粒生成を通して、雲粒の寄与の大きい降雪をもたらした。その後、総観規模の気象場の推移に伴い風が弱まるとともに雲粒生成も弱まり、雲粒の寄与の小さい降雪が 26 日深夜にかけてもたらされた。この前後で風向が南寄りから北寄りに変化し、27 日未明から、風の強まりとともに雲粒の寄与の大きな多量の降雪がもたらされた。圧密過程のみ考慮した簡易な計算を行い、積雪密度プロファイルを求めたところ、雲粒の寄与の大小に応じて積雪密度の小さい弱層に対応する層がみとめられた。このように、気象場および降雪粒子特性の劇的な変化が半日程度の短い間に起き、それが弱層形成に関与し得ることは、雪崩リスク評価・予測に取り組む上で注目すべき重要な知見である。

本研究課題において、雲物理学的モデリングと気象観測・積雪観測を組み合わせた分野横断的アプローチにより、降雪にともなう弱層形成メカニズムの具体的な姿に迫ることができた点は、上記知見とともに大きな成果であり、気象・雪氷分野の連携研究による新たな展開の可能性を表している。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K01340, 16K05557, 17K18453 の助成を受けたものです。湯元、中塩原、芦野、大丸、板室、清滝、中宮祠の気象観測データは、栃木県より提供していただきました。

引用文献

- 梶川正弘, 後藤博, 金谷晃誠, 菊地勝弘, 2004: 新積雪密度と降雪粒子の諸特性の関係. 雪氷, 66, 561-565.
- 梶川正弘, 後藤博, 猿渡琢, 金谷晃誠, 橋本正秀, 菊地勝弘, 2005: 新積雪密度と降雪粒子の諸特性の関係. 雪氷, 67, 213-219.
- 中村一樹, 佐藤友徳, 秋田谷英次, 2013: 降雪系弱層形成時の気象の特徴. 北海道の雪氷, 32, 14-17.
- 福田 正己, 前野紀一, 遠藤八十一, 秋田谷英次, 小林俊一, 竹内政夫, 2000: 雪崩と吹雪 (基礎雪氷学講座 第Ⅲ巻). 古今書院, pp236.

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℃～2.8℃、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。

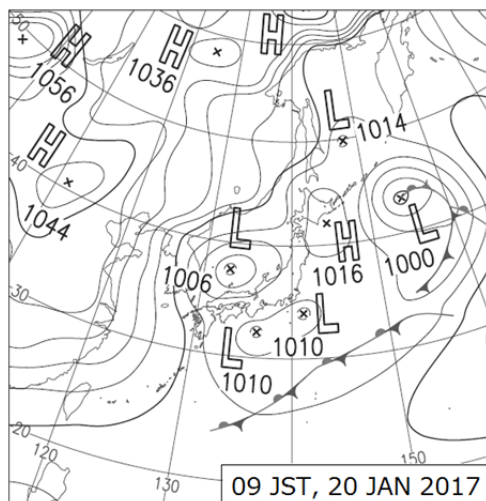


図-1 2017年1月20日0900JSTの地上天気図。

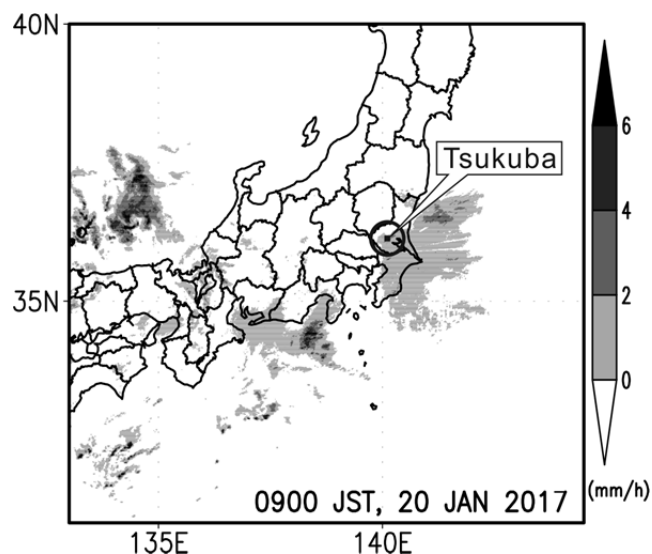


図-2 気象庁レーダー観測による2017年1月20日0900JSTの降水強度分布。丸で囲んだ領域は、つくば市に設置したKaバンド偏波レーダーの観測領域(半径30km)。

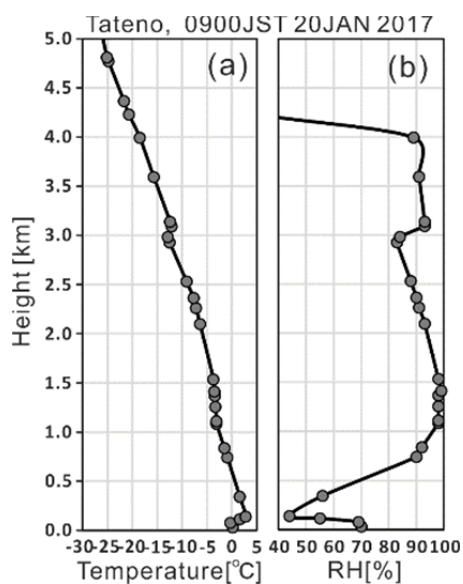


図-3 2017年1月20日0900JST館野における(a)気温と(b)相対湿度の高層観測データ。

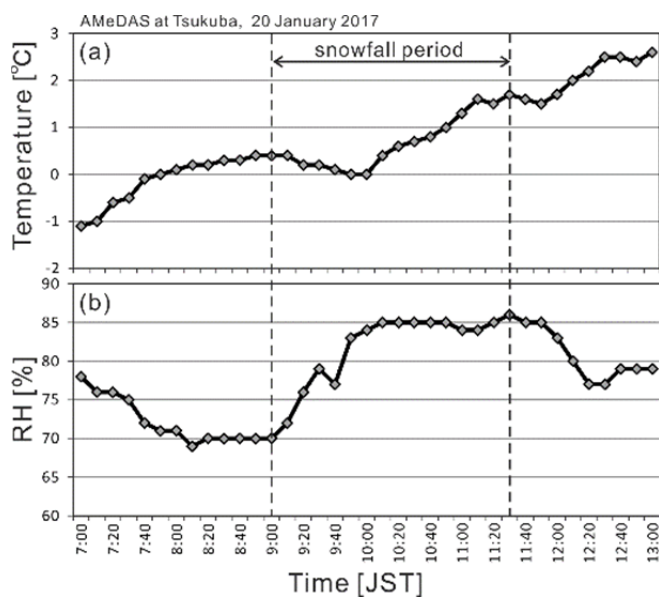


図-4 2017年1月20日つくばアメダス地点の(a)地上気温と(b)地上相対湿度。

表ー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 ($\sim 5\text{dBZ}$) 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．

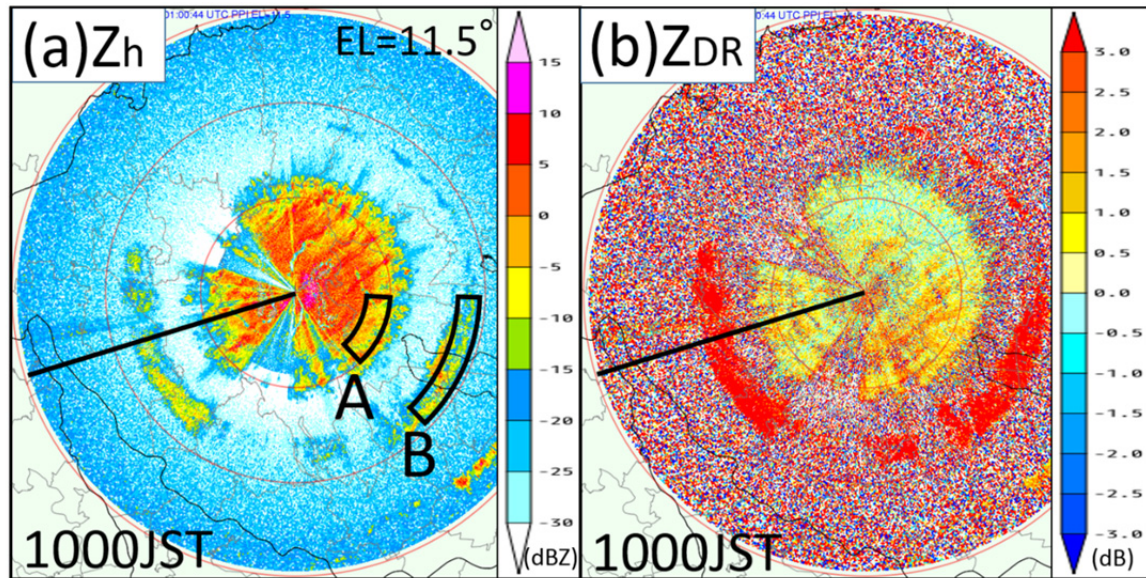


図-5 Ka バンド偏波レーダーで観測された 2017 年 1 月 20 日 1000JST の仰角 11.5° の PPI 画像．(a)レーダー反射因子，(b)レーダー反射因子差．観測半径は 30km.

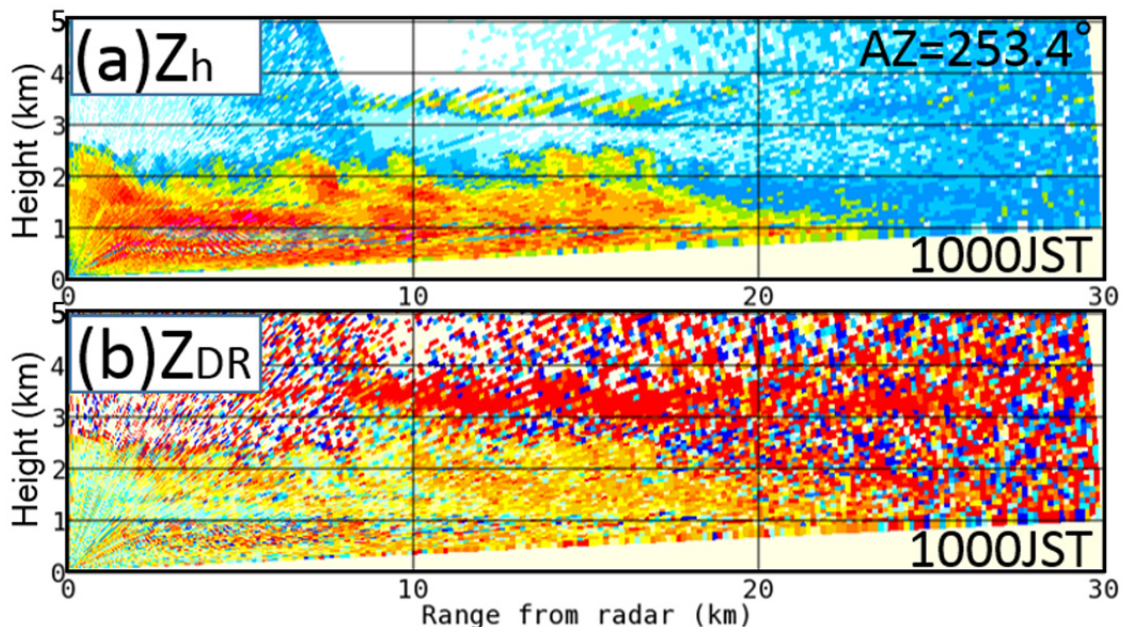


図-6 2017 年 1 月 20 日 1000JST の方位角 253.4° の RHI 画像．(a)レーダー反射因子，(b)レーダー反射因子差．各パラメータのカラースケールは図 5 と同じ．RHI 画像の位置は図 5 に示す．

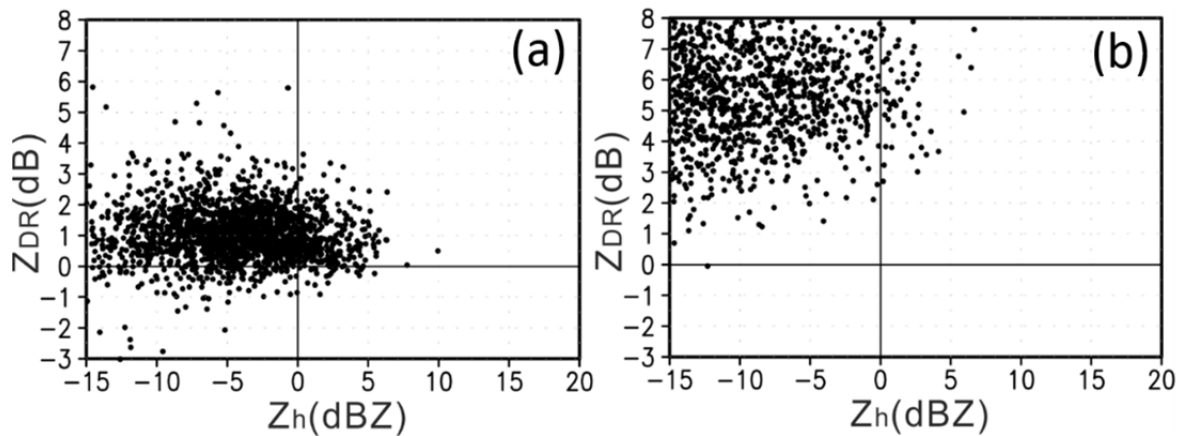


図-7 図5に示した(a)領域Aと(b)領域Bにおけるレーダー反射因子とレーダー反射因子差の関係.

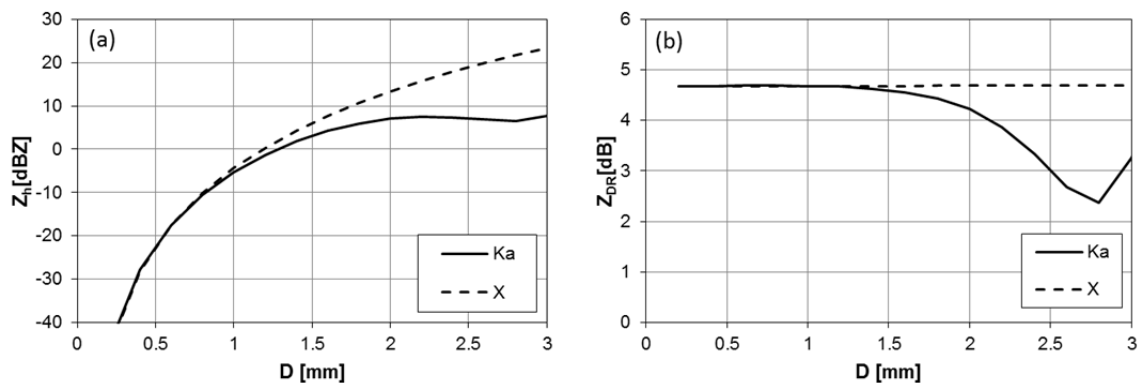


図-8 T-matrix 法による Ka バンドレーダー偏波パラメータの散乱計算結果. 参考のため, X バンドレーダーパラメータについても示す. 横軸は等価直径. 縦軸は(a)レーダー反射因子と(b)レーダー反射因子差. 計算は板状結晶を想定して行い, 以下の仮定を用いた. 温度: -15°C , 密度: 0.917g cm^{-3} , 軸比: 0.1, キャンティン角: (範囲) $0\sim 90^{\circ}$, (平均) 0° (分散) 20° , 仰角: 11.5° .

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.