

新潟県における新雪密度とKバンド鉛直レーダーの観測

The Density of Newly Fallen Snow and K-band Vertical Radar Observation in Niigata Prefecture, Japan

高見和弥⁽¹⁾・竈本倫平⁽¹⁾・鈴木賢士⁽²⁾・山口弘誠・中北英一

Kazuya TAKAMI⁽¹⁾, Rinpei KAMAMOTO⁽¹⁾, Kenji SUZUKI⁽²⁾,
Kosei YAMAGUCHI and Eiichi NAKAKITA

(1) 鉄道総合技術研究所

(2) 山口大学

(1) Railway Technical Research Institute, Japan

(2) Yamaguchi University, Japan

Synopsis

We observed the density of newly fallen snow with K-band vertical radar in Niigata prefecture, Japan. Focusing on the effect of riming on the density of newly fallen snow, we investigated the characteristics that appear in vertical radar observation data when riming growth is dominant: an increase in fall velocity and a decrease in the vertical gradient of radar reflectivity. In the case of graupel dominance, the increase in fall velocity was observed, and in the case of graupel-like snow dominance, the decrease in the vertical gradient of the radar reflectivity was observed.

キーワード: 降雪, 新雪密度, レーダー

Keywords: Snowfall, The density of newly fallen snow, Radar

1. はじめに

鉄道車両床下への着雪は、落下時に地上設備の破損や、分岐器の不転換を引き起こすことで冬期の列車運行の安定性を損なう雪害事象となる。着雪による被害を低減するためには駅での雪落とし作業を行う必要があり、この作業の実施判断を効率的に行うためには着雪量を精度よく推定することが求められている。床下への着雪量は走行時に線路上の雪が舞い上がる量と対応するため、新雪密度の与え方が重要となることが報告されている (Kamata et al., 2020)。

従来の手法では、新雪密度は気温などの気象要素を用いて簡易的に推定する方法がとられていた (Diamond and Lowry, 1954, 梶川ら, 2005, 野口ら, 2010, Judson and Deoesken, 2000, Helfricht et al., 2018

など)。Kamata et al. (2020)では、野口ら (2010) が青森県において1時間以内の短時間に観測した、式(1)の新雪密度と気温の経験式を利用している。

$$\rho = 58.6 \exp(0.488T) + 37.0 \quad (1)$$

ρ : 新雪密度 [kg m^{-3}], T [$^{\circ}\text{C}$]である。しかしながら、この方法は主に融解の有無や融解の程度による密度の違いを表現するものであり、降雪粒子の種別や大きさ、重さなどに影響される乾雪の密度の違いは表現することができない。そこで、我々は粒子の形状に関連する情報が得られる偏波レーダーを利用して、新雪密度を推定する手法を検討している。本研究ではその前段として、新潟県南魚沼市で実施した新雪密度の観測、降雪粒子の観測、鉛直レーダーによる

観測について紹介し、新雪密度の推定方法について検討する。

2. 観測

新潟県南魚沼市に位置する鉄道総合技術研究所塩沢雪害防止実験所 (37.04°N, 138.85°E, Fig. 1a) において、2021年12月から2022年2月まで観測を行った。本報告では、このうち①2022/1/13 13:00 - 2022/1/14 2:00, ②2022/1/20 9:00 - 2022/1/22 0:00の2事例を用いて解析を行った結果を示す。Fig. 3a, 4aに対象期間の地上の気温と相対湿度の時系列を示した。なお、以下時系列を示すグラフでは、2つの対象事例の時間軸のスケールをあわせるために①の事例では2022/1/13 12:00 - 2022/1/14 3:00を示すこととした。

後述する新雪密度の観測時の気温は全て0 °C未満であり、降雪板を置いていた時間帯の平均気温は、-2.46 °C~-0.57 °Cであった。

2.1 新雪密度

降雪板 (45 cm×45 cm, Fig. 2) を1時間設置し、板上に積もった雪の体積と、重さを測定することで新雪密度を観測した。降雪板上の雪の深さが1cm未満の事例は対象外とした。Fig. 3b, 4bに対象2事例の新雪密度の時間変化を示した。なお、Fig. 3b, 4b にプロットした時刻は、それぞれ降雪板上の雪を測定した時刻である。

対照とした2事例では計23時刻で新雪密度を観測した。2022/1/13 13:00 - 2022/1/14 2:00の事例では、観測した新雪密度の最大値は100.5 kg m⁻³ (2022/1/13 13:36 - 14:36), 最小値は48.3 kg m⁻³ (2022/1/13 17:52 - 18:52) であった。2022/1/20 9:00 - 2022/1/22 0:00の事例では、最大値は118.6 kg m⁻³ (2022/1/20 17:23 - 18:23), 最小値は48.4 kg m⁻³ (2022/1/20 9:00 - 10:00) であった。

2.2 Kバンド鉛直レーダー

Kバンド鉛直レーダー (METEK, Micro Rain Radar; 以下MRR) を用いて観測を行った。冠雪を避けるため、白熱電球の投光器を利用してアンテナ上に積もる雪を融解させた。観測データはMaahn and Kolias (2012)の手法を用いてノイズ処理を行い、レーダー反射因子Z [dbZ], 落下速度W [m/s], 速度幅SW [m/s]の鉛直分布の1分平均値を算出した。鉛直のサンプリング間隔は100m (最大観測距離3100m) である。Fig. 3c, d, eおよびFig. 4c, d, eに対象2事例における(c)Z, (d)W, (e) SWの時間・高度断面を示した。

先述した各事例の新雪密度の最大値を測定した時刻 (2022/1/13 13:36 - 14:36, 2022/1/20 17:23 - 18:23)

に着目すると、Fig. 4に示した2022/1/20 17:23 - 18:23の事例では対流の特徴である強く鉛直勾配の小さいレーダー反射因子の分布 (Fig. 4c) と3m/s以上の大きな落下速度 (Fig. 4d) が確認できる。このことから霰が降ったことにより大きな新雪密度がもたらされたことが考えられる。また、速度幅 (Fig. 4e) を見ると、新雪密度が大きな値を示した時刻では新雪密度が小さな時刻、例えば2022/1/20 9:00 - 10:00 (48.4 kg m⁻³) と比べて大きな値となっていた。一方で、Fig. 3に示した2022/1/13 13:36 - 14:36では落下速度は2 m/s未満であり、レーダー反射因子からも対流と考えられる分布は確認できなかった。加えて新雪密度の小さな時間帯 (2022/1/13 17:52 - 18:52, 48.3 kg m⁻³) よりも速度幅は小さな値を示していた。このことから、2022/1/13 13:36 - 14:36の事例では、2022/1/20 17:23 - 18:23とは異なり霰以外の要因で新雪密度が大きくなっていたと考えられる。

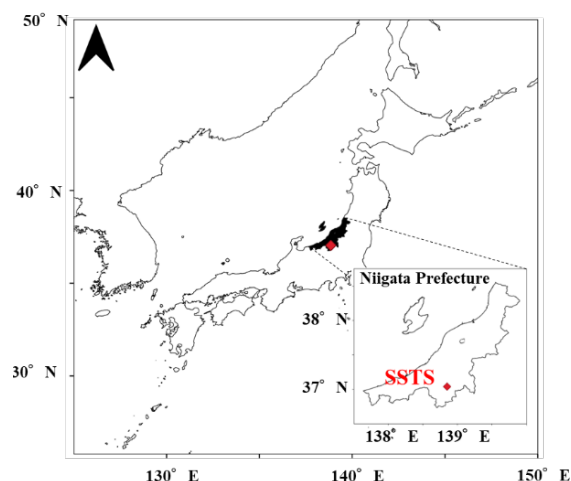


Fig. 1 The location of observation point (Shiozawa Snow Testing Station; SSTS)..



Fig. 2 Observation of the density of newly fallen snow using a snow board.

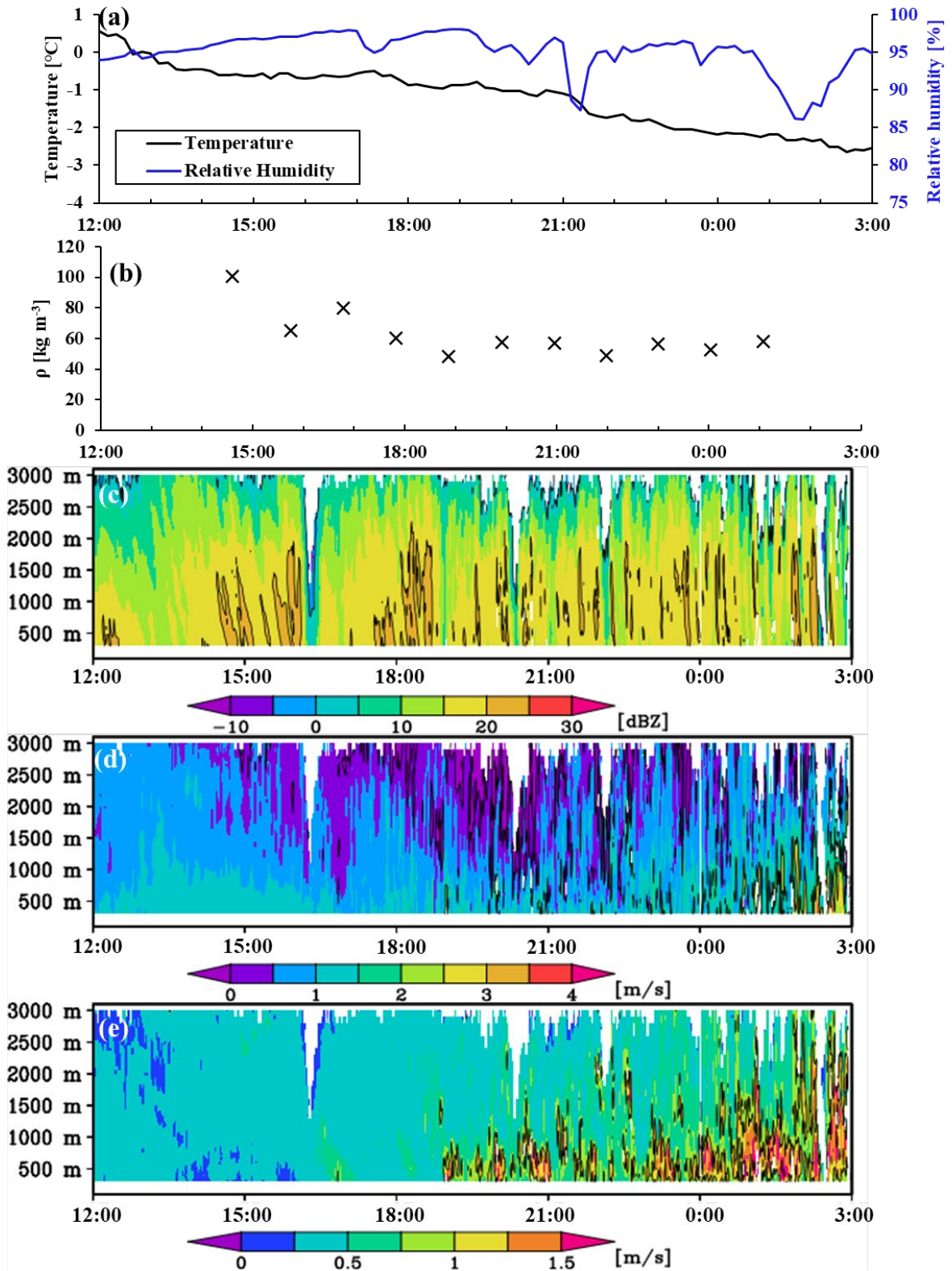


Fig. 3 1/13/2022 12:00 – 1/14/2022 3:00. (a) Temperature (black line) and relative humidity (blue line), (b) the density of newly fallen snow and time – height plot of MRR (c)Z, (d)W and (e)SW. The contour interval is (a)20 dBZ, (b)2 m/s and (c)1m/s.

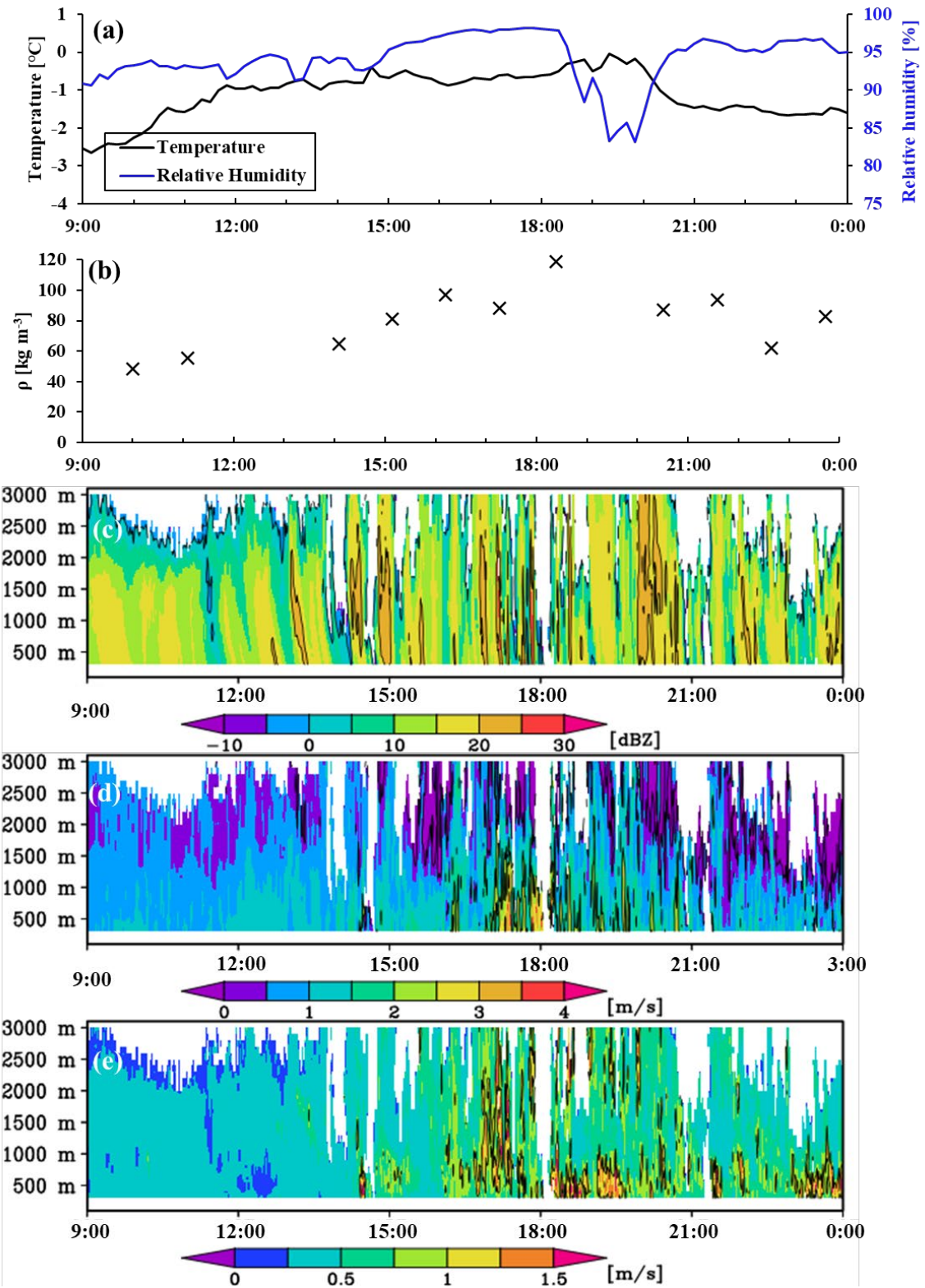


Fig. 4 1/20/2022 9:00 – 1/21/2022 0:00. (a) Temperature (black line) and relative humidity (blue line), (b) the density of newly fallen snow and time – height plot of MRR (c)Z, (d)W and (e)SW. The contour interval is (a)20 dBZ, (b)2 m/s and (c)1m/s.

2.3 降雪粒子の観測

高さ3.4mの防風ネット内、地上高1mに、降雪粒子の粒径・落下速度を測定できる光学式ディストロメータ (OTT, Parsivel²) と、降雪粒子の画像を取得できる地上設置型降水粒子撮像・重量計測システム (G-PIMMS, Suzuki et al., 2016) を設置し、観測を行った (Fig. 5) . Fig. 6に対象2事例でそれぞれ新雪密度が最大となった時刻 (2022/1/13 13:36 - 14:36, 2022/1/20 17:23 - 18:23) における粒径・落下速度分布を示した. 図中の曲線は着氷なし雪片 (Aggregates of unrimed radiating assemblages of dendrites) , 塊状の霰状雪 (graupel like snow of lump type) , 塊状霰 (lump graupel) の粒径・落下速度関係の経験曲線 (Locatelli and Hobbs, 1974) である. また, Fig. 7にG-PIMMSで観測した降雪粒子の画像の例を示した. 2022/1/13 13:36 - 14:36 について, G-PIMMSで得られた画像 (Fig. 7a) では目視で霰と思われる降雪粒子はほとんど確認できず, 画像例を示したように樹枝状の構造が明瞭でない, 極めて着氷成長の強い雪片が多く確認された. また,

粒径・落下速度分布 (Fig. 6a) についても塊状の霰状雪の経験曲線 (Locatelli and Hobbs, 1974) に近い分布であった. 一方で, 2022/1/20 17:23 - 18:23では, G-PIMMSで得られた画像から粒径が3mm以上となる大きな霰が多数確認された (Fig. 7b) . 粒径落下速度分布 (Fig. 6b) も塊状霰の経験曲線 (Locatelli and Hobbs, 1974) に近い分布であった. このように2つの事例で大きな新雪密度の値をもたらした降雪粒子の種別が異なることが降雪粒子観測で確認された.

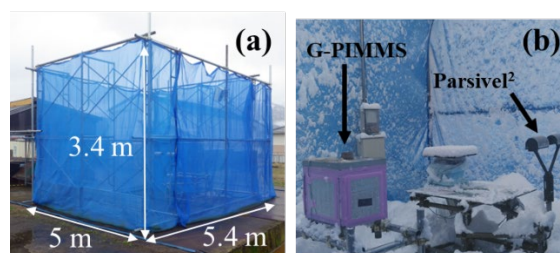


Fig. 5 (a)Sensors surrounded by 3-m-high net. (b)Parsivel² and G-PIMMS sensors.

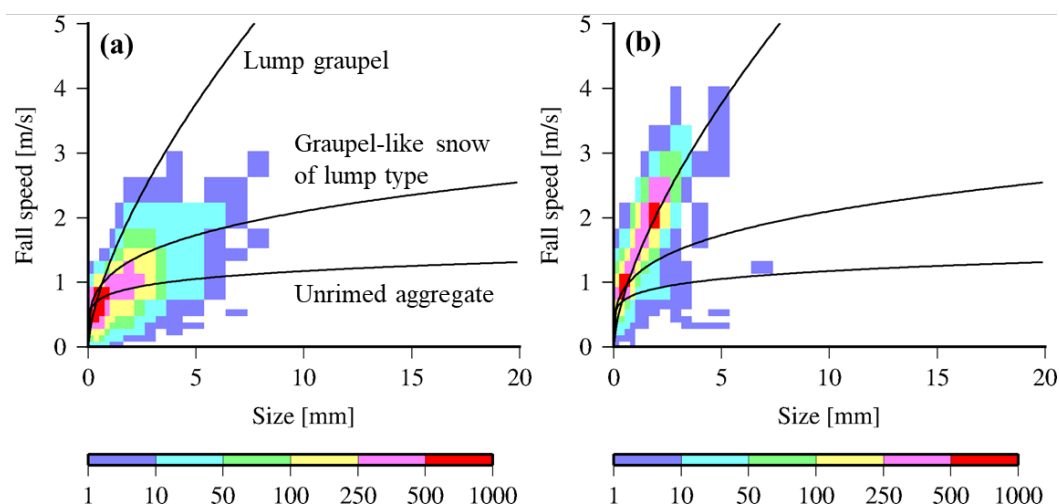


Fig. 6 Snow particles size and fall velocity distribution by Parsivel2. The color is the number of particles of each bin. The curves are in the figures are empirical relationships of lump graupel, graupel-like snow of lump type and unrimed aggregate (Locatelli and Hobbs, 1974). (a)1/13/2022 13:36 - 14:36, (b)1/20/2022 17:23 - 18:23.

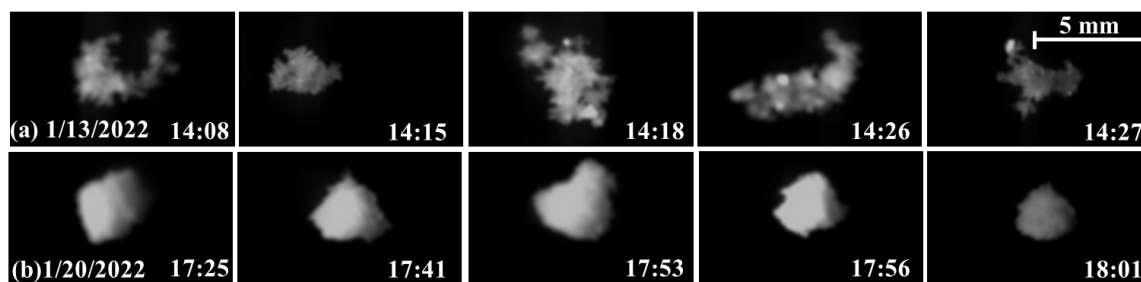


Fig. 7 Images of snowfall particles recorded by G-PIMMS. Brightness and contrast are adjusted by 40% each to make the shapes easier to see. (a)1/13/2022 13:36 - 14:36, (b)1/20/2022 17:23 - 18:23.

3. 新雪密度と鉛直レーダー観測の比較

降雪粒子は着氷成長の度合いが強くなり、重量が増えることで新雪密度を増加させることが知られている (Power et al., 1974; Colle et al., 2014, Ishizaka et al., 2016など). 着氷成長の度合いが大きくなるほど、レーダーで観測される落下速度は大きくなるとともに、樹枝状結晶が卓越する -15°C 前後の高度から地上へのレーダー反射因子の鉛直勾配が小さくなることから先行研究で報告されている (Schneebeli et al., 2013, Moisseev et al., 2015, Griffin et al., 2018, Vogel et al., 2018など). 落下速度の増加は着氷成長により降雪粒子の重量が増加するため、レーダー反射因子の鉛直勾配の減少は、併合成長による粒径の増加が抑制されるためであると考えられる. そこで, Fig. 3, Fig. 4に示した新雪密度を観測した22時刻について, MRRで観測した①落下速度, ②レーダー反射因子の鉛直勾配との関係性を調べた.

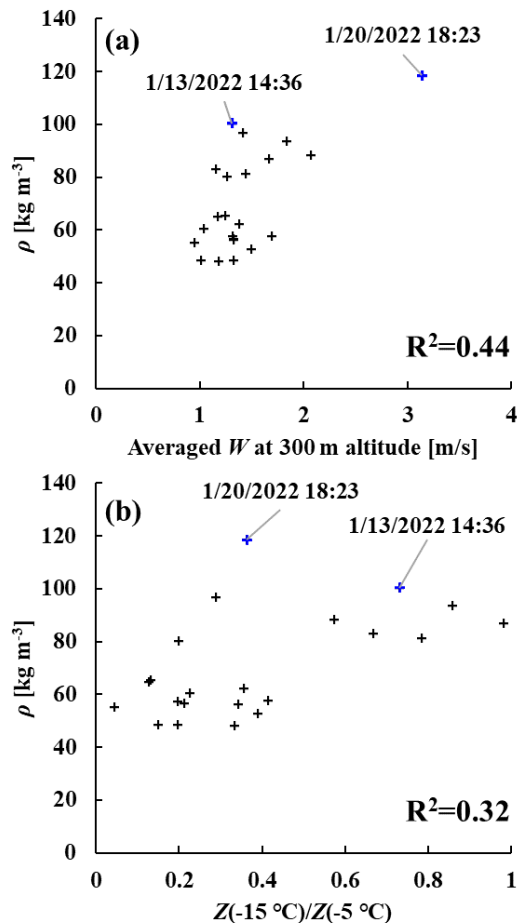


Fig. 8 Relationships between the density of newly fallen snow and (a) average fall speed at 300m altitude, (b) $Z(-15^{\circ}\text{C})/Z(-5^{\circ}\text{C})$. Blue plots are cases shown in Fig. 2, 3, 5 and 6.

落下速度はFig. 3, Fig. 4に示したように高度300m未満ではノイズ処理によりデータがマスクされているため, 高度300mの値を使用した. また, レーダー反射因子の鉛直勾配については, 気温の影響を考慮し, 地上気温から気温減率 $6^{\circ}\text{C km}^{-1}$ を仮定して計算した上空の気温を用いて求めた気温 -15°C , -5°C 相当の高度の値の比を用いた ($Z(-15^{\circ}\text{C})/Z(-5^{\circ}\text{C})$). なお, レーダー反射因子の勾配を計算するにあたり, $[\text{mm}^6 \text{ m}^{-3}]$ の単位に換算した. Fig. 8bにレーダー反射因子の時間平均値から求めた鉛直勾配と新雪密度をプロットした. Fig. 8に示したように落下速度が大きくなるほど, またレーダー反射因子の鉛直勾配が大きくなるほど ($Z(-15^{\circ}\text{C})/Z(-5^{\circ}\text{C})$ が小さくなるほど) 新雪密度が大きくなる傾向がみられた. ただし, どちらもばらつきが大きかった (R^2 値は0.44, 0.32).

2章で示した2事例のうち, 2022/1/20 17:23 – 18:23の霰が卓越した新雪密度が最大の事例では, 落下速度が特に大きな値を示している. 一方で, レーダー反射因子の鉛直勾配では新雪密度が小さい事例と明確に区別できるほど小さな値ではない. 一方で, 2022/1/13 13:36 – 14:36の霰状雪の事例では, 落下速度は大きな値ではないが, レーダー反射因子の鉛直勾配は小さな値を示している. このように霰の事例では落下速度, 霰状雪の事例ではレーダー反射因子の鉛直勾配に着氷成長の卓越時の特徴が示されていることが分かった. Fig. 9に落下速度, レーダー反射因子の鉛直勾配, 新雪密度の関係を示す. 新雪密度が大きい事例では, 落下速度が大きい, あるいはレーダー反射因子の鉛直勾配が小さい特徴を示していることが確認できた.

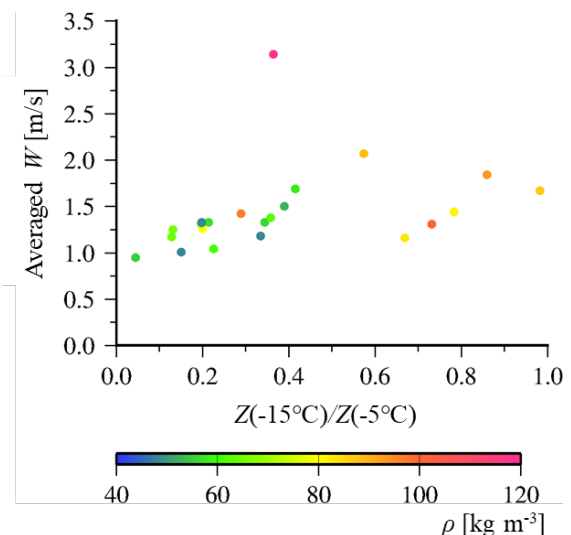


Fig. 9 Relationship between $Z(-15^{\circ}\text{C})/Z(-5^{\circ}\text{C})$, averaged fall speed (W) at 300 m altitude and the density of newly fallen snow (ρ).

4. まとめと今後の課題

本研究では、新潟県南魚沼市で実施した新雪密度、鉛直レーダー、降雪粒子観測について紹介し、新雪密度に対する着氷成長の影響に着目して、着氷成長の卓越時に鉛直レーダー観測データに現れる特徴、落下速度の増加とレーダー反射因子の鉛直勾配の減少を調べた。対象事例のうち、霰の卓越により新雪密度が大きくなる事例では落下速度の増加が、霰状雪の卓越により新雪密度が大きくなる事例ではレーダー反射因子の鉛直勾配の減少が確認できた。今後は降雪粒子の形状によって変化するパラメータを得られる偏波レーダーを利用して観測を実施することで、新雪密度の違いを表現することを検討する。

謝 辞

本研究で使用したデータは山口大学、日本気象協会、鉄道総合技術研究所の共同研究で取得した。

参考文献

- 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(3), pp.213-219.
- 野口守・小林等・河島克久・飯倉茂弘・伊豫部勉・藤井俊茂 (2010): 東北新幹線八戸・新青森間における雪害対策の研究 (6) 降雪直後の雪密度の気温依存性. In 雪氷研究大会講演要旨集 雪氷研究大会 (2010・仙台), pp. 174-174.
- Colle, B. A., Stark, D., & Yuter, S. E. (2014): Surface microphysical observations within east coast winter storms on Long Island, New York. *Monthly Weather Review*, 142(9), pp.3126-3146.
- Diamond, M. (1954): Correlation of density of new snow with 700-millibar temperature. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 11(6), pp.512-513.
- Griffin, E. M., Schuur, T. J., & Ryzhkov, A. V. (2018): A polarimetric analysis of ice microphysical processes in snow, using quasi-vertical profiles. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(1), pp.31-50.
- Helfricht, K., Hartl, L., Koch, R., Marty, C., & Olefs, M. (2018): Obtaining sub-daily new snow density from automated measurements in high mountain regions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), pp.2655-2668.
- Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Yamaguchi, S., Nakai, S., Shiina, T., & Muramoto, K. I. (2016): Relationships between snowfall density and solid hydrometeors, based on measured size and fall speed, for snowpack modeling applications. *The Cryosphere*, 10(6), pp.2831-2845.
- Judson, A., & Doesken, N. (2000): Density of freshly fallen snow in the central Rocky Mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(7), pp.1577-1588.
- Kamata, Y., Shishido, M., & Sato, R. (2021): Method for Estimating Snow Accretion on Shinkansen Bogies using Weather Data. *Quarterly Report of RTRI*, 62(4), pp.245-250.
- Locatelli, J. D., & Hobbs, P. V. (1974): Fall speeds and masses of solid precipitation particles. *Journal of Geophysical Research*, 79(15), pp.2185-2197.
- Maahn, M. & Kollias, P. (2012): Improved Micro Rain Radar snow measurements using Doppler spectra post-processing. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(11), 2661-2673.
- Moisseev, D. N., Lautaportti, S., Tyynela, J., & Lim, S. (2015): Dual - polarization radar signatures in snowstorms: Role of snowflake aggregation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(24), pp.12644-12655.
- Power, B. A., Summers, P. W., & d'Avignon, J. (1964): Snow crystal forms and riming effects as related to snowfall density and general storm conditions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 21(3), pp.300-305.
- Schneebeil, M., Dawes, N., Lehning, M., & Berne, A. (2013): High-resolution vertical profiles of X-band polarimetric radar observables during snowfall in the Swiss Alps. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52(2), pp.378-394.
- Suzuki, K., Nakagawa, K., Kaneko, Y., Oki, R., & Nakamura, K. (2016): Microphysical features of solid/melting particles by ground-based direct observations for the GPM/DPR algorithm development. In 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 3941-3944.
- Vogel, J. M., & Fabry, F. (2018): Contrasting polarimetric observations of stratiform riming and nonriming events. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(2), pp.457-476.

(論文受理日：2022年8月31日)