

地上粒子分布を考慮した降雪の移流距離推定に向けた感度分析

Sensitivity analysis considering terminal fall velocity distribution of particles for estimating snowfall advection

大屋 祐太¹, 野口 泉¹, 鈴木 啓明¹, 三村 慧¹
Yuta Ohya¹, Izumi Noguchi¹, Hiroaki Suzuki¹, Satoru Mimura¹

Corresponding author: ooya-yuuta@hro.or.jp (Y. Ohya)

¹北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所

¹ Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization

To quantify how snow-particle properties modulate horizontal advection, we installed a laser precipitation monitor (LPM) disdrometer on the rooftop of the Energy, Environment and Geology Research Institute located in Sapporo, Japan and observed during the 2023/24 and 2024/25 winters. Observed particle diameter–fall velocity (D–V) distributions were objectively clustered with a self-organizing map (SOM), yielding several distinct snowfall classes. Composite radiosonde profiles indicate that wet-snow events occur under warmer, moister, and stronger-wind environments than dry-snow events. Finally, a sensitivity analysis assuming a uniform horizontal wind shows that realistic perturbations of the representative fall velocity substantially alter the estimated horizontal advection distance.

1. はじめに

降雪粒子は降雨粒子に比べて落下速度が遅く(孫野, 1954; Nakaya, 1954)、風の影響を強く受けるため水平移流が生じることが指摘されている(小野ら, 1990; 佐々木ら, 1999)。北海道における水平風による地表面付近の降雪粒子の移流を推計した研究(大宮, 2020)はあるが、雪粒子は結晶形状・含水率・密度などが多様であり、これらの物理特性が気流と相互作用する機構を定量化する試みは限定的である。

近年、気候変動に伴う気温上昇により、北海道のような積雪寒冷地域でも将来的には雪質が変化する可能性が示唆されている(e.g. Sato et al., 2023)。雪質が変化すると粒子の落下速度や空気抵抗が変わり、同一風場下でも粒子が地表に到達するまでの時間が変化するため、水平移流距離が大きく変動すると考えられる。既往の気候モデル

では雪質依存の落下時間や水平移流の影響が十分に考慮されておらず、降雪域の補正を必要とする。本研究の目的は、降雪粒子の物理特性と風場を観測から推定し、簡易的な水平移流推定による感度分析を実施する。これにより、降雪粒子の物理特性によって影響しうる水平移流の変化量を示し、気候変動下における降雪域の将来予測や積雪量評価モデルの検討に資する基礎知見を得る。

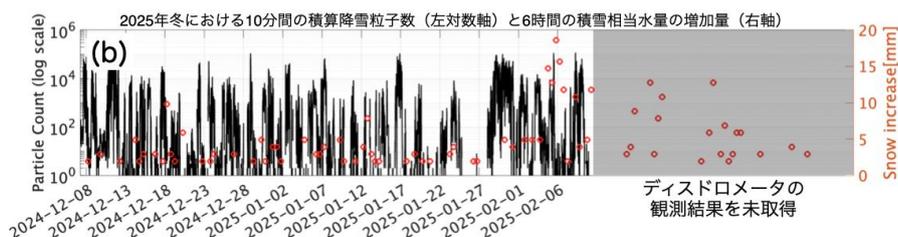
2. 手法

2. 1 観測手法

本研究の観測は、札幌市に位置する北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所の敷地内で実施した。観測機器として、クリマテック株式会社製のレーザー式ディストロメーター(CTC-LPM)を使用した。CTC-LPMは、降水粒



図-1 (a) 観測機器の設置写真



(b) ディストロメーターによる観測結果
黒実線はディストロメーターの粒子数、赤丸は積雪重量計の増加量を示す

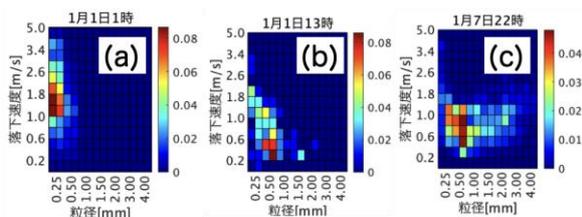


図-2 粒径(横軸)-落下速度(縦軸)の観測例

表-1 雪質タイプの分類

分類	特徴
乾雪	粒径が大きいほど落下速度が小さい
湿雪	粒径・落下速度とも分布が広い
大雪	湿雪のうち降水強度が突出して大きい
小雪	降水強度 5 mm h^{-1} 未満

子の粒径および落下速度を高精度で測定可能であり、冬季環境下でも安定した性能を有することが確認されている(中井ら、2023)。同機器は、メーカーによる点検後、研究所本館屋上(地上約10 m)に設置した(図-1)。データ記録には、専用のデータロガーを用い、1分間隔の積算値を取得した。2023-2024年シーズンではmicroSDカードに、2024-2025年シーズンではクラウド通信サービスを介してデータを保存した。なお、風防オプションは使用しなかった。

2. 2 使用した気象データ

気象場の解析には、高層気象データおよび解析データを使用した。高層気象データは、観測地点から約2 km離れた札幌管区気象台で午前9時と午後9時に実施されるラジオゾンデ観測のデータを使用した。このデータはUniversity of Wyomingのウェブサイトで公開されているものを取得した。さらに三次元的な気象データとして、気象庁のメソ数値予報モデルGPVデータを使用した。このデータは、京都大学生存圏研究所の生存圏データベースから取得した。

2. 3 解析手法

ディストロメーターで得られた粒径および落下速度データは、粒径を22区分、落下速度を20区分に分類し、各組み合わせにおける粒子数をマトリクス形式で記録し、自己組織化マップ(SOM: Self-Organizing Map, Kohonen, 1990)を用いた機械学習によって 5×5 ユニットに投影し、粒径-落下速度パターンマップを生成した。観測期間内で

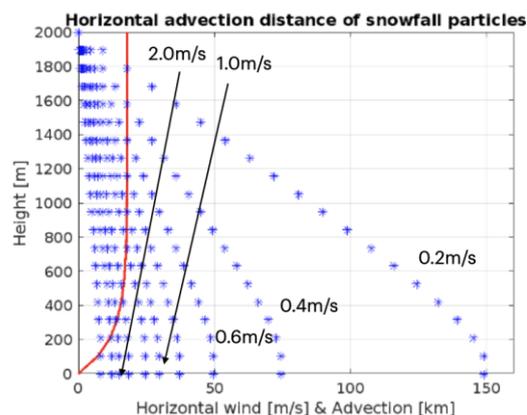


図-3 落下速度に対応する水平移流距離の比較
赤線はドップラーレーダーから推定した水平風速、青印は上空から落下する降雪粒子の軌跡

降雪が計測された時刻における観測データは、生成したパターンマップに分類したのち、雪質タイプを定義した。

内陸部にかけて大雪をもたらした代表事例について、降雪粒子の水平移流距離を推定する感度解析を実施した。水平風速の鉛直分布は、同時刻におけるドップラーレーダーの観測値から算出し、落下速度から求めた滞留時間を組み合わせることで、水平移流距離を求めた。

3. 結果

3. 1 降雪粒子の物理特性の分類

図-2は、ディストロメーターで取得した粒径22区分 \times 落下速度20区分(計440次元)の粒子数の観測事例を示す。図-2(a)は、落下速度が速い粒子が多く、図-2(b)(c)では、落下速度が遅い粒子が多いなど、観測事例によって落下速度には大きな幅を持つことがわかった。同観測結果を、大屋(2025)では自己組織化マップ(SOM, $5 \times 5 = 25$ ユニット)に投影し、粒径-落下速度パターンマップを生成した。生成したパターンマップに対して、観測期間内で降雪が計測された時刻における観測データを最も類似したパターンへ分類したのち、特に特徴的な4種については、雪質タイプを定義した(表-1)。

3. 2 降雪時の大気環境の特徴

地上から対流圏下層までの風向・風速は、降雪量の多い事例では、水蒸気供給層となる高度500–1000 m付近で西北西から北北西の卓越風が吹き、降雪量が増すほど同高度の風速も強くなる。

対照的に小雪タイプは弱い南寄りの風が支配的である。一方、乾雪タイプは湿雪混在時に比べて地表から上空まで低温・低湿で発生しており、粒径が大きいくほど落下速度が遅い乾雪特有の分布を示した。また石狩に設置された国土交通省のXRAINのドップラー速度から、水平風速はおおよそ15から20 m s⁻¹であることを確認した。

3. 3 水平移流の感度分析

気象条件を踏まえ、代表事例について一定の水平風速に複数の落下速度を組み合わせて感度解析を実施した(図-3)。その結果、降雪粒子の水平移流距離は、数kから数十kmまで変化し、特に落下速度1 m s⁻¹以下の乾雪が卓越するケースでは大きな水平移流(30km以上、最大80km規模)が起こり得ることが分かった。

4. 考察とまとめ

落下速度0.6 m s⁻¹の乾雪粒子が大多数を占め、かつ高度400 m以上で20 m s⁻¹の強い風が吹いた大雪事例について、レーダーで得た地上より2km上空の降雪分布に、水平移流を加味して地上へ再配置したところ、推定される降雪分布には顕著な偏差が見られた。すなわち、水平移流を考慮しない現況レーダー速報値は、降雪域を下流側へ過小評価する可能性が示された。

【謝辞】

本研究の遂行にあたり、北海道大学山田朋人教授、富山大学島田互准教授から観測機器を提供いただきました。また国土交通省が提供し、文部科学省の補助事業により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で収集・提供された

XRAINを利用しました。記して謝意を述べます。

【参考文献】

- 1) 孫野長治. (1954). 雪の結晶の落下速度. *雪氷*, 15(6), 1-4.
- 2) NAKAYA, Ukichiro. *Snow crystals: natural and artificial*. Harvard university press, 1954.
- 3) 小野節夫, 菅原透, 笹本誠, 堺茂樹, & 平山健一. (1990). 風の影響を考慮した降雪分布予測について. *水工学論文集*, 34, 103-108.
- 4) 佐々木憲孝, 長谷川俊介, 笹本誠, 平山健一, 堺茂樹 (1999): レーダによる降雪観測について. *水工学論文集*, 43, 269-274.
- 5) 大宮哲, 國分徹哉, 松下拓樹, 高橋丞二, & 松澤勝. (2020). XバンドMPレーダによる地上吹雪の定量的把握の可能性. *雪氷*, 82(3), 145-156.
- 6) Sato, Y., Kamada, M., Hashimoto, A., & Inatsu, M. (2024). Future change in the contribution of riming and depositional growth to the surface solid precipitation in Hokkaido, Japan. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 63(10), 1097-1112.
- 7) 中井専人ら, 光学式ディストロメーター観測に基づく固相および液相の降水粒子自動分類. *天気*, 2023, 70.1: 5-11.
- 8) KOHONEN, Teuvo. The self-organizing map. *Proceedings of the IEEE*, 78.9: 1464-1480, 1990.
- 9) 大屋祐太, 石狩川下流域における降雪粒径分布観測と雪質分類に基づく気象特性解析, 令和6年度研究助成「石狩川水系における冬期の水資源量の高度観測と将来予測」報告書, 2025.