

2024–2025 年冬期に道内 4 地点で観測された 積雪中ブラックカーボン濃度について

Variations of black carbon concentrations in snow sampled at 4 observation sites in Hokkaido during the 2024-2025 winter

三村 慧¹, 野口 泉¹, 山口 高志¹, 秋山 雅行¹, 鈴木 啓明¹, 大屋 祐太¹, 堤 拓哉²
Satoru Mimura¹, Izumi Noguchi¹, Takashi Yamaguchi¹,
Masayuki Akiyama¹, Hiroaki Suzuki¹, Yuta Ohya¹, Takuya Tsutsumi²
Corresponding author: mimura-satoru@hro.or.jp (S. Mimura)

¹北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所,

²北海道教育大学 旭川校

¹ Research Institute of Energy, Environment and Geology, Hokkaido Research Organization (HRO),

² Asahikawa Campus, Hokkaido University of Education

Concentrations of black carbon (BC) in snow, which are estimated from light-absorbance of Light-Absorbing Particles accumulated on membrane filter, were obtained by snow-sampling at 4 observation sites in Hokkaido during the 2024-2025 winter. Time and spatial variations in snow BC concentrations were revealed, which seemed to be affected by atmospheric transport in Japanese winter. Additional data of BC concentration in atmosphere and analyses about BC concentration in snowfall and contribution of snowmelt may help to understand about definition processes of BC concentration in snow.

1. はじめに

1. 1 雪観測の経緯

積雪寒冷地である北海道において、雪解けは社会生活に関わりの深い現象である^{1,2)}。例えば、農地であれば農作物の作付け時期を、スキー場であれば冬季営業の終了時期をそれぞれ決定する。また、水資源の安定性を考える上で水源域の融雪特性は重要な要素となる^{3,4)}。このことから、融雪予測は社会生活にとって重要な情報と言える。

融雪予測に有効な手法の一つに積雪変質モデルが挙げられる。このうちスイスで開発されたオープンソースの SNOWPACK は、先行研究における検証の結果、日本での利用においていくつかの課題が指摘されている⁵⁾。そこで我々は、これら課題解決に資する気象や積雪に関する知見を蓄積する目的で、2023-2024 年冬期から札幌における積雪観測を開始した⁶⁾。

得られた観測結果について SNOWPACK による再現計算を実施したところ、雪解け時期の融雪量を SNOWPACK が過大評価する傾向が見られた。この要因の一つとしては、SNOWPACK における雪面反射率(アルベド)を含む日射影響の再現性不足が疑われる。

1. 2 本研究の目的

SNOWPACK では、入力した気象データを基に積雪の量や内部構造の時間変化が計算される。ここで日射は融雪の重要な熱源となる⁷⁾が、“雪の汚れ”⁸⁾に起因するアルベド変化については、積雪変質モデル単体では計算されない。

雪の汚れをもたらず光吸収性エアロゾル(Light-Absorbing Particles: LAPs)に関しては、極域をはじめとする雪氷圏に与える影響について、雪氷アルベド・フィードバックを介した気候変動への影響の観点からこれまでに多くの議論がなされている^{9,10,11)}。一方で北海道など季節積雪の地域における影響については、気象庁気象研究所を中心とした札幌での継続的な研究実績がある^{12,13)}ものの、相対的には研究事例が少なく、特に時空間分布に関する報告は見当たらない。

このような背景から本研究は、北海道における LAPs の積雪中濃度の時空間分布の実態や、アルベド変化を介した融雪への影響、また LAPs の大気輸送が積雪中 LAPs 濃度の時空間分布に与える影響を把握し、得られた知見を積雪変質モデルにフィードバックすることを目的とする。本論文では、2024-2025 年冬期の観測結果を報告する。



図 1 札幌における雪観測の様子

2. 手法

2. 1 観測手法

札幌では2023-2024年冬期と同様に積雪重量と各種気象要素を観測した⁶⁾のに加え、本冬期は新たに積雪深観測、積雪断面観測、および積雪コアサンプリングを定期的実施した。積雪深は、積雪重量計付近に設置した標尺を基準として、定点カメラによるタイムラプス撮影画像と週3日ほどの現場観測から、目視によっておよそ日ごとの観測値を得た(図1a)。積雪断面観測と積雪コアサンプリングについては、およそ1週間間隔で積雪重量計から東方に少し離れた位置で実施し、後者についてはステンレス製円筒型サンプラー¹⁴⁾を用いて、積雪全層分のコアを1本以上採取した(図1b)。なお積雪断面観測に関する詳細は、本誌に別途掲載の鈴木らによる報告に詳述される。

札幌ではこれらに加え、観測サイトに隣接する建屋の屋上にガラス製ビーカーを試験的に設置

し、およそ1週間間隔でビーカーを取り替えることにより、降雪試料の採取も実施した(図1c)。

また本冬期は、札幌の他に新たに旭川、美唄、上富良野(吹上温泉)の3地点を観測サイトに加え、それぞれ計3回ずつ積雪断面観測と積雪コアサンプリングを実施した(概要は図2のとおり)。

2. 2 分析手法

LAPs 濃度の分析については、観測で得られた雪試料を1-2日程度冷蔵室もしくは常温で融解させた後、濾過器を用いてメンブレン濾紙(ADVANTEC製,47mmφ,ポアサイズ:0.8μm)に集積させ、大きなゴミは取り除いた上で積分球を用いて濾紙の吸光度を測定した。そして大気試料を基に事前に確認されている検量線¹⁶⁾に基づき、吸光度をブラックカーボン(BC)濃度に変換した。

3. 結果と考察

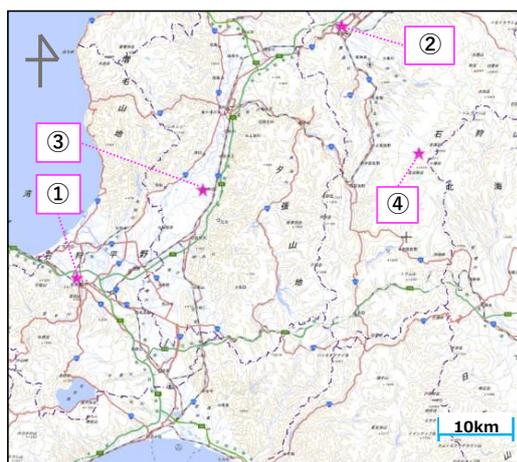
3. 1 積雪中BC濃度の時空間分布

図2の各サイトでそれぞれ得られた積雪中BC濃度の時間変化について図3に示す。ここで、札幌の結果については、得られたサンプルの重量と積雪重量計観測の比較から、氷板下の弱層が十分に採取できなかった可能性が高い1サンプル(※)について、網掛けとしている。

4地点の分布を比較すると、①いずれの地点でも冬の終わりにかけてBC濃度が増加する傾向が見られた。一方で、地点による濃度の差も見られ、②特に標高の高い吹上温泉については、BC濃度の増加が小さい結果となった。

3. 2 LAPsの大気輸送の影響

図3の結果をLAPsの大気輸送の観点から考察するため、4地点を通して観測を行った各観測日(図2の②~④を参照)前15日間の後方流跡線をそれぞれ7日間分計算した^{17,18)}。



番号	サイト名	(およその位置)			周囲の地形/土地利用	観測時期
		緯度 [度]	経度 [度]	標高 [m]		
①	札幌	43.0812	141.3336	12	低地/市街地	1週間おき(1月以降)
②	旭川	43.7881	142.3466	107	段丘/市街地	2/12, 2/27, 3/10
③	美唄	43.3287	141.8160	18	低地/農地	2/10, 2/25, 3/10
④	吹上温泉	43.4317	142.6430	1014	山地/笹地・森林	2/13, 2/26, 3/11

図 2 観測サイトの概要(地理院地図¹⁵⁾に追記)

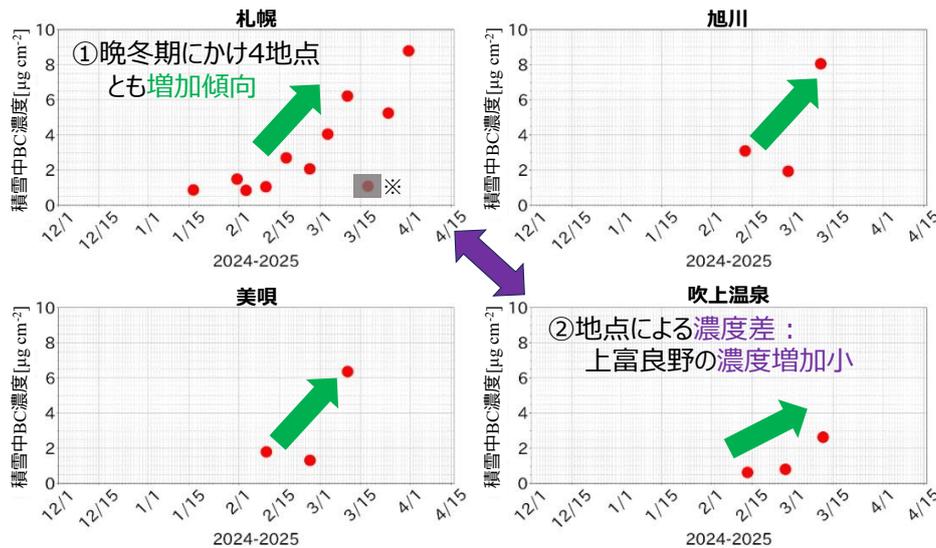


図 3 道内 4 地点で観測された積雪中 BC 濃度の時間変化

図 4 に札幌の(a)2月12日と(b)3月11日の観測についての結果を示す。両者を比較すると、前者の移流経路が比較的北寄り分散傾向である一方、後者では北西方向から大陸上を通り直線的に移流する経路が主となっていた。この傾向は、他 3 地点でも同様に見られた。北日本付近では、2 月は冬型の気圧配置が比較的多く見られたのに対し、3 月には大陸からの低気圧や前線の通過が多く見られ、図 4 の結果に反映されたと考えられる。図 4 に見られる移流経路の差が図 3①に寄与した可能性について、札幌サイト内の国設大気観測局で観測された大気中 BC 濃度¹⁹⁾を参照したが、本稿執筆時点では 2 月までのデータしか公開されておらず(2 月は積雪中 BC 濃度と同様に大気中 BC 濃度も増加が小さいことを確認)、考察を今後に譲った。図 3②については、大気の水方向の移流経路に地点による差は見られず、より局地的な影響の寄与が考えられた。

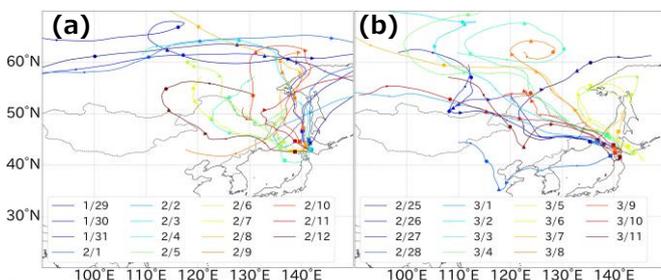


図 4 札幌を起点とした後方流跡線計算の結果
(各日とも日本時間午前 10 時を起点に計算)

3. 3 降雪・積雪の変化による影響

札幌における降雪試料中の BC 濃度(表 1)は

3 月末に増加し、積雪中 BC 濃度の変化と一定の対応があった。今後は大気中 BC 濃度を用いて乾性沈着の影響を分離し、降雪中 BC 濃度の変化による影響の考察を目指す。また、積雪中 BC 濃度の増加が融雪期に重なることから、融雪の影響についても考察していく必要がある。

表 1 ビーカーで採取された降雪試料中 BC 濃度

ビーカー設置日	ビーカー回収日	BC濃度 [$\mu\text{g cm}^{-3} \text{ day}^{-1}$]	ビーカー設置日	ビーカー回収日	BC濃度 [$\mu\text{g cm}^{-3} \text{ day}^{-1}$]
2024/12/29	2025/1/16	0.18	2025/2/25	2025/3/3	0.78
2025/1/27	2025/1/31	1.13	2025/3/3	2025/3/10	1.19
2025/1/31	2025/2/3	0.52	2025/3/10	2025/3/17	0.50
2025/2/3	2025/2/10	0.12	2025/3/17	2025/3/24	0.65
2025/2/10	2025/2/17	1.20	2025/3/24	2025/3/31	2.62
2025/2/17	2025/2/25	0.24			

4. まとめ

2024-2025 年冬期に道内 4 地点において積雪観測を実施した。積雪コアサンプリングにより得られた雪試料を融解・濾過して LAPs を濾紙に集積させ、積分球による吸光度分析と検量線を基に積雪中 BC 濃度を得た。その結果、①4 地点とも晩冬にかけて BC 濃度が増加する傾向が見られた一方、地点間の比較では②特に標高の高い吹上温泉について、BC 濃度の増加が小さい結果となった。後方流跡線からは、移流経路の違いがこれら特徴に寄与した可能性が示唆された。今後は、観測データのさらなる収集と追加解析により、積雪中 BC 濃度が決定されるプロセスについて、より具体的に考察していく。

【謝辞】

積雪観測について、旭川では北海道教育大学旭川校の敷地内にて、美唄では農業・食品産業技術総合研究機構北海道農業研究センター美唄試験地敷地内にて、吹上温泉では吹上温泉保養センター白銀荘の管理敷地内にて、それぞれ実施させて頂きました。吸光度分析は、北海道大学大学院工学研究院環境工学部門地域環境研究室の積分球を用いて実施させて頂きました。

【参考文献】

- 1) 野口泉, 濱原和広, 芥川智子, 山口高志, 鈴木啓明, 長谷川祥樹, 小野理, (2021): 積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究I-降雪・積雪の変化の影響-. 北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所報告, **1**, 69-74.
- 2) 野口泉, 鈴木啓明, 山口高志, 長谷川祥樹, 大屋祐太, 芥川智子, 小野理, 濱原和広, (2024): 積雪寒冷地における気候変動の影響評価と適応策に関する研究 III -冬および雪の変化に関する気候変動影響の分類-. 北海道立総合研究機構エネルギー・環境・地質研究所報告, **3**, 1-7.
- 3) 山田朋人, (2024): 流域を対象とした過去・将来における水資源の利用可能性. 北海道河川財団研究所紀要, **35**(8), 145-168.
- 4) 川村一人, 中津川誠, 白谷友秀, (2010): 気候変動が積雪地域の水循環と水利用へ与える影響について. 水工学論文集, **54**, 445-450.
- 5) 平島寛行, 山口悟, 小杉健二, 根本征樹, 青木輝夫, 的場澄人, (2015): 断面観測結果を用いた積雪変質モデルの検証. 雪氷, **77**(1), 5-16.
- 6) 大屋祐太, 鈴木啓明, 野口泉, 三村慧, 堤拓哉, (2024): 積雪重量計を用いた札幌市における 2023-2024 年冬季の観測について. 北海道の雪氷, **43**, 123-124.
- 7) 近藤純正, (1994): 水環境の気象学 -地表面の水収支・熱収支-. 東京, 朝倉書店, 350pp.
- 8) 青木輝夫, 田中泰宙, (2008): 1. 大気エアロゾルの沈着が積雪アルベドに与える影響 (2007 年度秋季大会シンポジウム「雪氷圏から語る気象と気候」の報告). 天気, **55**(7), 538-547.
- 9) Hansen, J., Nazarenko, L. (2004): Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **101**(2), 423-428.
- 10) Skiles, S.M., Flanner, M., Cook, J.M., Dumont, M., Painter, T.H. (2018): Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nat. Clim. Chang.*, **8**, 964-977.
- 11) Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., Wang, H. (2020): A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-science reviews*, **210**, 103346.
- 12) Aoki, T., Motoyoshi, H., Kodama, Y., Yasunari, T. J., Sugiura, K., Kobayashi, H., (2006): Atmospheric aerosol deposition on snow surfaces and its effect on albedo. *SOLA*, **2**, 013-016.
- 13) Niwano, M., Kajino, M., Kajikawa, T., Aoki, T., Kodama, Y., Tanikawa, T., Matoba, S. (2021): Quantifying relative contributions of light - absorbing particles from domestic and foreign sources on snow melt at Sapporo, Japan during the 2011 - 2012 winter. *Geophys. Res. Lett.*, **48**(16), e2021GL093940.
- 14) 佐竹研一, (2000): 酸性雨研究と環境試料分析-環境試料の採取・前処理・分析の実際-. 東京, 愛智出版, 291pp.
- 15) 国土地理院: 地理院地図(電子国土 WEB). <https://maps.gsi.go.jp> (2025 年 6 月 24 日閲覧).
- 16) 本多宏充, (2013): 大気汚染測定フィルターを再利用した黒色炭素エアロゾルの測定. 平成 24 年度北海道大学修士論文.
- 17) 国立環境研究所: 地球環境データベース 流 跡 線 解 析 (METEX). <https://db.cger.nies.go.jp/ged/metex/ja/index.html> (2025 年 6 月 24 日閲覧).
- 18) Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., Becker, E. (2011): NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) Selected Hourly Time-Series Products. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research; Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.
- 19) 環境省: PM2.5 成分自動測定データ. https://www.env.go.jp/air/osen/pm_resultmonitoring/post_25.html (2025 年 6 月 24 日閲覧).