

融雪にともなう積雪表面での不純物の濃縮過程の定量的理解

Quantitative understanding of the concentration processes of impurities on snow surface during snowmelt

西野 沙織^{1,2}, 的場 澄人¹
Saori Nishino^{1,2}, Sumito Matoba¹

Corresponding author: nishino@lowtem.hokudai.ac.jp (S.Nishino)

積雪変態モデルの課題の一つは融雪にともなう化学成分の移動過程の再現である。特に融雪初期に観測される積雪表面での不純物の濃縮は、積雪表面のアルベドの変化に大きな影響を与えるため、モデルの精密化が必要である。本研究では、札幌の融雪期において表面積雪に含まれる不溶性微粒子濃度の変化と大気降下物量を観測し、不純物の表面濃縮過程を定量的に考察した。

1. はじめに

雪の粒形や雪質変化、融解プロセス再現する積雪変態モデルが開発されている。特に、気象庁気象研究所で開発されている SMAP モデル¹はアルベド計算の精密化に特化している。各モデルの共通の課題として、融雪水に伴う化学成分の移動がある。特に、融雪初期に生じる積雪表面での不純物濃縮は、積雪表面のアルベド変化に大きな影響を与えるにもかかわらず、それを定量的に示した研究はごくわずかである。Kuchiki et al. (2015)²は、2007 年・2013 年の 6 冬期間、札幌における積雪表面に含まれる不純物濃度の季節変化を示し、鉍物ダスト、元素状炭素 (EC)、有機炭素 (OC) は 3、4 月の融雪期に高濃度になるという結果を示した²⁾。融雪期に積雪表面の不純物が高濃度となる主な原因は、①融雪によって流下しづらい粗大不純物粒子の積雪表面への濃縮、②黄砂などの大気降下物の増加、③表面雪の昇華、蒸発によって水分子が損失したことによる不純物粒子の濃縮などが考えられる (図 1)。本研究では、この①と②の過程に着目し、融雪にともなう積雪表面への積雪中不純物の濃縮過程を定量的に理解することを目的とした。ここで、EC と OC は強い光吸収性を示ため、軽視することはできない³⁾。しかし、雪面での濃度は、EC と OC よりも鉍物ダストの方が高いこと、少量の積雪試料から EC と OC の粒径を分析することは難しいことから、本研究では鉍物ダストの挙動のみを取り上げる。



図 1 研究概要

2. 研究方法

2. 1 観測

積雪観測を、2024 年 3 月 11 日から 3 月 16 日の間の 5 日間、北海道大学低温科学研究所北側の気象観測露場で実施した。およそ午前 9 時と午後 3 時の 1 日 2 回、表面から 3 cm 深と 3-6 cm 深の積雪試料をダストフリーのポリエチレン袋に採取した。同時に、雪質、雪温、積雪密度、積雪の含水率を観測した。積雪試料は雪面表層 0-3 cm を表層、3-6 cm を亜表層として密度サンプラー (100 mL) を用いてダストフリーのポリエチレン袋にそれぞれ 3 回採取した。なお 3 月 16 日だけは、午前と午後に加えて正午の観測も実施した。

¹ 北海道大学低温科学研究所

² 北海道大学大学院環境科学院

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University



図 2 積雪観測の様子

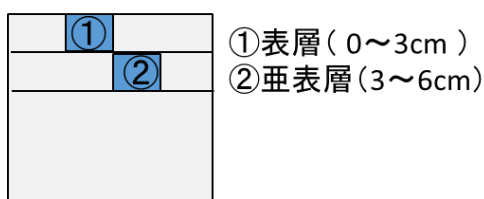


図 3 積雪採取面の真横からのイメージ

午前の積雪試料採取と午後の積雪試料採取の間の時間、直径 18 cm、高さ 14 cm の円柱状容器を雪面から 1.5 m の高さでポールに固定し大気物降下物を採取した。容器の中には、大気降下物の再飛散を防ぐために超純水を入れた。積雪試料は分析まで冷凍で保存し、大気降下物を捕集した超純水は捕集した容器にいったまま冷蔵で保存した。



図 4 大気降下物採取用の円柱状容器

3 月 12 日は積雪全層で雪温が 0 °C となった。また、3 月 14 日 12:00 に約 1 cm の降雪を記録した以外に、観測対象時間内での降雪は観測されなかった。

2. 2 分析

積雪試料は採取したポリエチレン袋にいれたまま室温で融解させ、溶液試料中の不溶性微粒子の体積濃度をコールターカウンター (Beckman Coulter-Multisizer3) で測定した。測定には孔径 100 μm のアパチャー径を使用した。測定される粒径は 2-60 μm である。測定には試料 100 μL 、または 1500 μL を使用し 3 回の測定の平均の値を採用した。なお、本研究では、粒径 2-10 μm の測定値を解析に用いた。

2. 3 不溶性微粒子の移動量計算

積雪中の単位時間単位面積あたりの不溶性微粒子の移動量を、以下の計算式で算出した。

$$F_d = (C_2 \cdot m_2 \cdot \rho_w^{-1} - C_1 \cdot m_1 \cdot \rho_w^{-1}) \rho_d \cdot S^{-1} \cdot T^{-1}$$

$F_d (\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1})$: 2 回の観測間の積雪中不溶性微粒子の移動速度

$C_1 (\mu\text{m}^3 \text{m}^{-3})$: 積雪中の不溶性微粒子体積濃度 (午前サンプル)

$C_2 (\mu\text{m}^3 \text{m}^{-3})$: 積雪中の不溶性微粒子体積濃度 (午後サンプル)

$m_1 (\text{kg})$: 採取した積雪の質量 (午前サンプル)

$m_2 (\text{kg})$: 採取した積雪の質量 (午後サンプル)

$\rho_w (\text{kg m}^{-3})$: 水の密度

$\rho_d (\text{kg m}^{-3})$: 不溶性微粒子の密度

$S (\text{m}^2)$: 積雪試料を採取した範囲の面積

$T (\text{hour})$: 2 回の観測間の時間

また、円柱状容器と雪面で同量の気降下物が沈着すると仮定して、大気降下物量を以下の計算式で算出した。

$$F_d = C \cdot V \cdot \rho_d \cdot S^{-1} \cdot T^{-1}$$

$F_d (\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1})$: 大気降不溶性微粒子の沈着速度

$C (\mu\text{m}^3 \text{m}^{-3})$: 容器内の溶液中の不溶性微粒子の体積濃度

$V (\text{m}^3)$: 観測終了時の円柱状容器中の残存液の体積

$\rho_d (\text{kg m}^{-3})$: 不溶性微粒子の密度

$S (\text{m}^2)$: 円柱状容器開口部の面積

$T (\text{hour})$: 2 回の積雪観測間の時間

3. 結果と考察

3. 1 積雪中不溶性微粒子移動量と大気降下物の収支

図 5 に積雪中の単位面積あたりの不溶性微粒子の質量の変化を示す。3 月 14 日は降雪があったため除外した。また、表 1 に観測日毎の 2 回の観測期間中の積雪中不溶性微粒子量の変化速度、大気降下物沈着速度、積雪中の不溶性微粒子量の収支を示す。

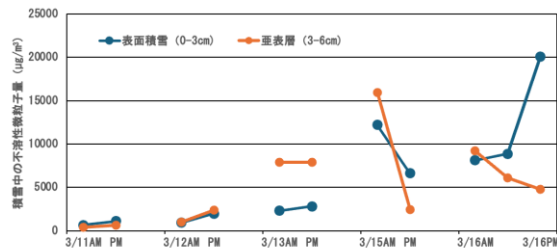


図 5 3/11-16 の積雪表層と亜表層積雪中の単位面積あたりの不溶性微粒子 (2-10 μm) の量の変化

表 1 観測日毎の積雪中不溶性微粒子量変化速度、大気降下物沈着速度、積雪中の不溶性微粒子量の収支

観測日	3/11	3/12	3/13	3/15	3/16AM	3/16PM
積雪中不溶性微粒子量変化速度 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)						
表層	68.6	181	76	-1881	253	3778
亜表層	278	244	0.71	-4545	-1053	-449
大気降下物沈着速度 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	101	282	178	503	521	258
積雪中不溶性微粒子量収支 ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)						
表層	-32.4	-101	-102	-2384	-268	3520
表層+亜表層	245.6	143	-101.29	-6929	-1321	3071

積雪中の不溶性微粒子量の増加は大気降下物による付加と融雪時に不溶性微粒子を含まない融雪水が流下することによる表面濃縮によって生じ、積雪不溶性微粒子の減少は融解水とともに不溶性微粒子が流下し積雪層から除去されることによって生じると仮定して以下を考察する。

3 月 11 日、12 日は表層、亜表層とも不溶性微粒子量が増加した。積雪中不溶性微粒子量変化速度は、11 日は表層で $68.6 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、亜表層で $278 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であり、12 日は表層で $181 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、亜表層で $244 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であった。ここから、この 2 日の日中の表層、亜表層では、融雪水移動による不溶性微粒子の損失よりも大気降下物の付加効果が大きいことが考えられる。3 月 12 日には積雪の全層が 0°C になったことが観測され、積雪内での融解水の流下が促進されたことも考慮すると、積雪層の不溶性微粒子量の増加に

は大気降下物の付加に加えて表面濃縮効果が現れていると考えられる。

13 日の積雪中不溶性微粒子量変化速度は、表層で $76 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、亜表層で $0.71 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であり、11 日、12 日のそれよりも小さかった。この日の大気降下物沈着速度は $178 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であるため、積雪中不溶性微粒子の増加量が、大気降下物の付加よりも小さい。15 日の積雪中不溶性微粒子量変化速度は、表層で $-1881 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、亜表層で $-4545 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であり、著しく不溶性微粒子量が減少した。それに関わらず、この日の大気降下物沈着速度は $503 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ と、観測期間の中で 2 番目に大きい数値であった。ここから、13 日あたりから積雪表面融解による不溶性微粒子流出が始まり、15 日にかけて不溶性微粒子の流出が加速したと考えられる。なお、アメダス札幌観測所では、15 日は 10:00-15:00 の間に 3 cm の融雪を記録している。本来であれば、積雪変態による、積雪深の沈降量を考慮した不溶性微粒子量変化速度の議論をしなければならないところである。この点に関しては今後の課題とする。

16 日は、午前と午後の観測に加えて正午にも観測を実施した。表層では一日を通じて積雪中不溶性微粒子量が増加した。この変化速度は、午前から正午にかけては $253 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、正午から午後にかけては $3778 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であった。また、大気降下物沈着速度は、午前から正午にかけては $521 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 、正午から午後にかけては $258 \text{ mm}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ であった。午前中は積雪表層での不溶性微粒子の増加速度と大気降下物の沈着速度が同程度であり、主に大気降下物による付加によって積雪表層中の増加が引き起こされたことが分かる。午後は積雪表層中の増加量は、大気降下物による付加を大きく上回り、融解による表面濃縮による効果が大きいことが予測される。一方、亜表層は一日を通じて積雪中不溶性微粒子量が減少し、融解にともなう流出の効果が大きかったことが分かる。積雪中不溶性微粒子変化速度が表層で正であるにもかかわらず、亜表層で大きく負の値になっていることから、雪面にあたる日射が積雪内部で熱として蓄積されて融解を引き起こす積雪の内部融解が起きたことが可能性の一つとして考えられる。この内部融解の過程は、現在の積雪変態モデルでは考慮されていない過程である。今後、観測場所の近傍で観測されている気象データ、放

射収支データと比較しながら、内部融解過程の有無、不溶性微粒子の流下に対する定量的な効果について考察を進める。

3. 2 積雪中不溶性微粒子濃度の個数濃度

図6は3月12日の積雪中不溶性微粒子の粒径分布を示す。前項で述べたように12日は表層、亜表層とも不溶性微粒子量が増加しており、3月11日から3月16日のなかで積雪表面濃縮がおきている可能性が最も高いと考えられる。この図からは、中央粒径 $2\mu\text{m}$ 付近の個数濃度が、表層、亜表層ともに午前から午後にかけて高くなる傾向がみられた。粒径が小さい不溶性微粒子ほど、積雪融解による流出が大きいと定性的には考えられているが、今回の結果は逆の傾向を示した。12日の表層の体積含水率は、午前が3.5%、午後が11.5%であった。また、亜表層の体積含水率は、午前が0.6%、午後が4.4%であり、表層と亜表層のどちらも午前から午後にかけて体積含水率が増加した。ここでは、積雪内の帯水によって不溶性微粒子が滞留する効果なども考えられるため、今後は含水率を含めた積雪の物理条件と照らし合わせながら不純物移動を検証する必要がある。それに加えて、今回の検証では大気降下物による雪面への付加効果と積雪表面濃縮効果がそれぞれどれくらいの割合で発生しているのか明らかにできていないため、大気降下物の付加がない状態での室内実験も検討している。

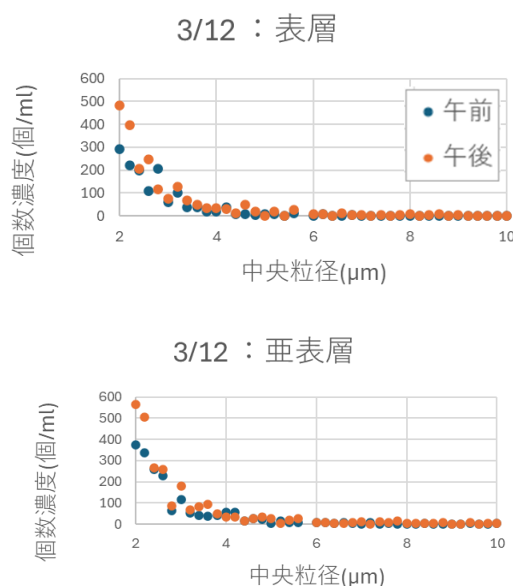


図6 積雪中不溶性微粒子の粒径分布

4. まとめ

積雪表面での不純物濃縮課程を札幌で調査した。観測では、大気降下物の雪面沈着と雪面融解による流出効果がみられ、札幌の場合は大気降下物による付加効果が積雪中の不溶性微粒子量へ大きく寄与していると考えられる。今回の観測では、大気降下物による雪面への付加効果と積雪表面濃縮効果の切り分けができていないため、今後は、融雪による不溶性微粒子の挙動を知るために、大気降下物の付加がない室内実験を検討している。

【謝辞】

本研究は、低温科学研究所環オホーツク圏ネットワーク事業と北極域研究加速プロジェクト(ArCSII)(JPMXD1420318865)から一部支援をいただきました。

【参考文献】

- 1) Niwano et al., 2012: Snow Metamorphism and Albedo Process (SMAP) model for climate studies: Model validation using meteorological and snow impurity data measured at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.* **117**, F03008
- 2) Kuchiki, K. et al., 2015: Elemental carbon, organic carbon, and dust concentrations in snow measured with thermal optical and gravimetric methods: Variations during the 2007-2013 winters at Sapporo, Japan. *J. Geophys. Res.* **120**, 868-882.
- 3) Aoki et al., 2011: Physically based snow albedo model for calculating broadband albedos and the solar heating profile in snowpack for general circulation models. *J. Geophys. Res.* **116**, F03008