

## 積雪の比表面積と粒径との関係

### Relation between SSA and grain size of snow

八久保晶弘 (北見工業大学), Martin Schneebeli (スイス連邦雪・雪崩研究所),  
山口悟 (防災科学技術研究所), 堀雅裕, 谷川朋範 (宇宙航空研究開発機構),  
杉浦幸之助 (富山大学), 的場澄人 (北海道大学低温科学研究所),  
庭野匡思, 朽木勝幸, 青木輝夫 (気象研究所)

Akihiro Hachikubo, Martin Schneebeli, Satoru Yamaguchi, Masahiro Hori, Tomonori  
Tanikawa, Konosuke Sugiura, Sumito Matoba, Masashi Niwano, Katsuyuki Kuchiki,  
Teruo Aoki

#### 1. はじめに

積雪のアルベドは積雪粒子の粒径や不純物濃度等に依存することが知られている<sup>1)</sup>. 特に, 近赤外領域のアルベドは積雪粒径や粒子の形状(雪質)に大きく影響される<sup>2)</sup>. 従来の積雪粒径測定方法は, ルーペ(通常, 倍率 10 倍)と粒度ゲージを用いた目視による観察であり, 多くの場合, 積雪粒子の長径が記載される. しかしながら, 積雪粒子の粒径の定義は明確ではなく, 研究者が目的に応じて粒径を定義し, 測定している. 我々は, 樹枝状六花の結晶の枝の幅や, ざらめ雪の単結晶粒, しもざらめ雪の条線の間隔などをスケール付 50 倍ルーペで測定し, これを  $d_2$  と呼んでいる.  $d_2$  は光学的粒径(光学的に等価な粒径)に近いことが, 野外観測<sup>3)</sup>および数値モデル計算結果<sup>2)</sup>から示されている. しかしながら, 積雪粒径には分布があり,  $d_2$  の野外観測ではその最大値, 最小値, 平均値を目視で求めるのはやや困難である. したがって, 積雪粒径は雪質判定とともに観測者に依存する部分が多い測定項目といえる.

他方では, 積雪アルベドは積雪の比表面積(Specific Surface Area, 以後 SSA と表記)との相関がよい, との認識が広まりつつある<sup>4)</sup>. すなわち, 我々の興味, そして本研究の主題は, 我々が従来測定してきた  $d_2$  と積雪 SSA との関係性はどのようなものか, である. 積雪の SSA は片薄片を用いて古くから測定されているが<sup>5,6)</sup>, 片薄片製作とその画像解析は多くの困難をとまなうため, 適用例は少ない<sup>7)</sup>. X 線 CT による三次元解析法については,  $\mu$ -CT を用いて  $10\mu\text{m}$  立方程度の解像度まで達するが<sup>8)</sup>, 片薄片法と同様, 比較的大きな SSA を有する新雪などの雪質には不利とみられる. 最近注目されているのは, 近赤外領域の吸収を用いる光学的手法である<sup>9,10)</sup>. 研究者によっていくつかの測定様式が考案され, 中には製品として既に実用化・市販されているものもある. 手軽に短時間で測定可能な光学的手法は現在, SSA 測定法の主流となりつつある. しかしながら, 積雪アルベドに密接に関連する SSA の導出に光学的手法を用いるのは, 堂々巡りの感が否めない.

これらに対し, BET 理論を用いたガス吸着法は, 多孔質体の SSA を測定する手法として広く用いられており, 原理的にも光学的手法から完全に独立している. Legagneux ほか<sup>11)</sup>は吸着ガスにメタンを用いる積雪 SSA 測定法を確立した. 八久保ほか<sup>12,13)</sup>はこのガス吸着法をベースに, 野外観測等でも使用可能でコンパクトな積雪 SSA 測定装置を開発した. 最近では, 等温変態条件下における積雪試料の SSA が低下する様子が詳細に観察され, 特に低温域における SSA 低下速度の温度特性が報告されている<sup>14)</sup>.

これまで、 $d_2$  と積雪 SSA との関係性を求めた例はなかった。本研究では、同一の積雪試料について  $d_2$  を目視観察で求め、その比表面積をガス吸着法で測定し、比較を行なった結果を報告する。

## 2. 測定装置および測定方法

ガス吸着法の原理の詳細および測定系については既報<sup>12,13)</sup>を参照されたい。2011年にプロトタイプが完成、翌年には改良を続けながら2~5号機を作成し、現在は4号機(図1)と5号機がSSA測定に使用されている。



図1 積雪比表面積測定装置 (4号機)

本研究においては、メタンを吸着ガスに用いた。測定で使用するヘリウムとメタンは50mLステンレス容器にわずかに封入されており、野外測定においてガスボンベ等を準備する必要がない。測定には液体窒素が必要であるが、後述する中札内村における6日間の測定(1日あたり4試料、計24試料)では、試料冷却・運搬・測定・真空ポンプ用トラップ等の用途を全て含め、約35Lの消費量だった(デュワー瓶からの自然蒸発も含む)。野外ではドライシッパー(ベーパーシッパー)を持参し、現地で試料を容器に封入後、すぐに液体窒素温度に冷却した。なお、1試料あたりの測定に要する時間は約1時間だった。

## 3. 測定試料

測定に用いた積雪試料、計83試料は以下の4地点で2014年に採取された。

### 3.1. 北見工業大学 (2014年1月26日, 1月31日, 3月21日, 4月17日)

雪質は降雪直後の新雪が主体であり(28例)、他にこしまり2例・しまり2例・ざらめ1例を大学構内グラウンドおよび野球場にて採取した。これらの試料は低温室に保管され、一定温度の環境下で変態が進んだ試料についても測定を行なった。

### 3.2. 北海道河西郡中札内村元札内 (2014年2月22-27日)

中札内村の農場にて、こしもざらめ13例を主体とした雪質の積雪試料を採取した。その他、積雪上層のこしまり3例、融解再凍結により生じたざらめ5例、および積雪最下層のしもざらめ3例を採取した。

### 3.3. スイス雪・雪崩研究所(ダボス)およびサンモリッツ (2014年3月9-13日)

2014年3月にスイス雪・雪崩研究所で開催された Intercomparison of Snow Grain Size Measurements Workshop にて、様々な雪質の積雪試料に関する国際比較測定が実施された。現地で採取され低温室に保存されたこしまり1例・しまり9例や、低温室内で人工的に温度勾配をかけて生成させたこしもざらめ1例、しもざらめ3例のSSAを測した。一方では、サンモリッツのテニスコート上の積雪について観測が実施された。

現地で積雪層を切り出し，ドライアイス温度で保存，実験室に持ち帰ったブロック試料（こしまり 1 例・しまり 5 例・こしもざらめ 1 例・しもざらめ 1 例）から採取した。

3. 4. 森林総合研究所十日町試験地（2014 年 3 月 17-18 日）

新潟県十日町市で開催された第 4 回 SIGMA プロジェクトワークショップに先立ち，積雪粒径相互比較観測が実施された。現地ではざらめ雪のみ 4 例が測定された。

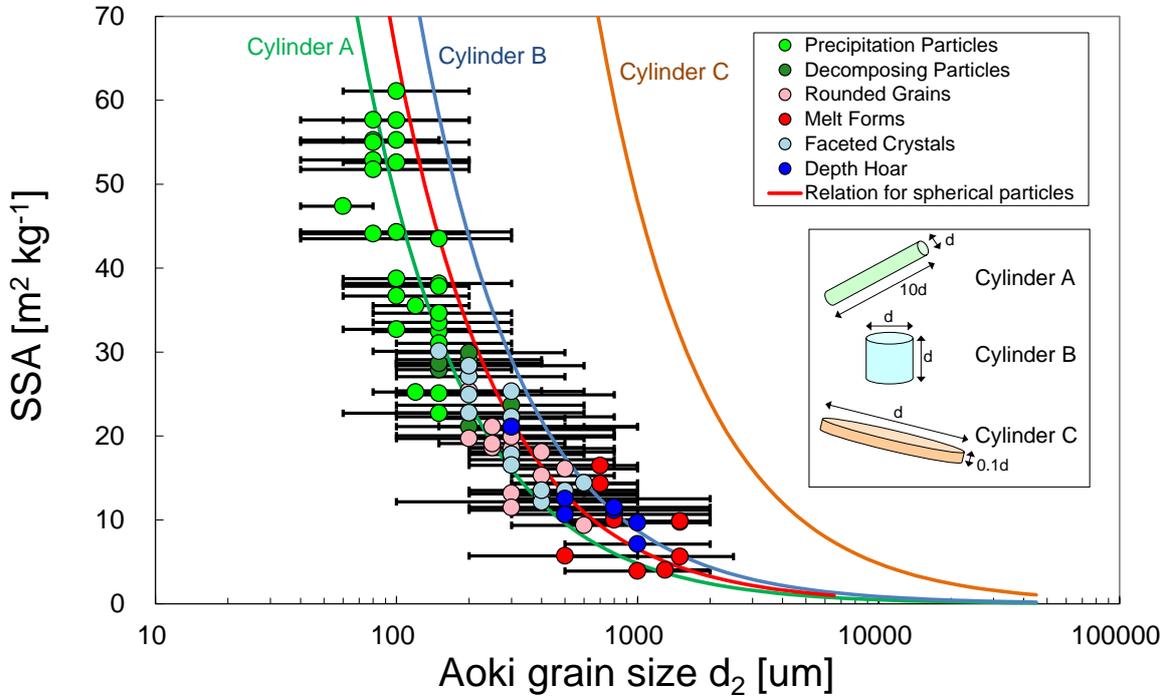


図 2 積雪粒径  $d_2$  と比表面積 SSA との関係

4. 測定結果および考察

はじめに，SSA 測定値の信頼性について述べる。BET 法では SSA と同時に氷表面へのメタンの吸着熱が計算される。本実験では  $2531 \pm 117$  [J mol<sup>-1</sup>]であり，Domine ほか<sup>15)</sup>の報告値である  $2540 \pm 200$  [J mol<sup>-1</sup>]とほぼ一致することから，SSA 測定値の信頼性は高いと考えられる。

次に、 $d_2$  と積雪 SSA との関係を図 2 に示した。まず，SSA 測定データに焦点をあてる。雪質ごとの SSA は，新雪：23-61 [m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]，こしまり：20-30 [m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]，しまり：9-25 [m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]，ざらめ：4-16 [m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]，こしもざらめ：12-30 [m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]，しもざらめ：7-21 [m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]のそれぞれの範囲であった。これらの結果を文献値<sup>6,15)</sup>と比較すると，新雪でやや小さめのデータが多いものの，他の雪質ではおおむね同程度とみられる。すなわち，新雪では SSA が最も大きく，等温変態が進むにつれてこしまりからしまりへ，また一方では温度勾配下でこしもざらめからしもざらめへと SSA が減少し，そして融解再凍結によりざらめとなって SSA が最も小さくなる方向へ変化する。

図 2 中の赤線は積雪粒子が球体の場合における  $d_2$  と積雪 SSA との関係である。測定データは，粒子形状が球体に近づく領域（しまり雪など，SSA が 20[m<sup>2</sup>kg<sup>-1</sup>]以下）でこのラインにおおむね沿っているものの，SSA が比較的大きい新雪では，同じ SSA でも  $d_2$  を球相当粒径より過小評価している。そもそも，新雪の  $d_2$  については細長い樹枝の枝の幅などを測定している。形状は球体からかけ離れているため，仮に粒子が細

長い円柱状 (Cylinder A, 図 2) であると仮定し, その直径を  $d_2$  としてプロットすると, 新雪の  $d_2$  と SSA の関係に近づく. したがって, 新雪のような明らかな非球形粒子のどの部分を粒径の代表値とするか, という問題がこれらの関係に影響していることが示唆される.

## 5. まとめ

本研究では, 我々の研究グループが従来測定してきた積雪粒径  $d_2$  と比表面積 SSA との間に一定の関係があることを初めて具体的に明らかにした. このことは,  $d_2$  が光学的粒径と密接な関連があることを定量的に示し, 先行研究<sup>2,3)</sup>の結果を支持するとともに, 過去の  $d_2$  データを SSA に変換可能であることを示唆している.

## 謝辞

本研究は科学研究費 (基盤研究 S:23221004) および 2013-2015 年 JAXA GCOM 研究費「GCOM-C/SGLI による雪氷アルゴリズム高度化・新規開発及び, 地上観測と気候モデルによる検証に関する研究」の助成を受け, また平成 23-25 年度北海道大学低温科学研究所共同研究 (「積雪変質・アルベド過程モデル開発のための積雪物理量及び熱収支に関する観測的研究 1-3」, 代表者: 青木輝夫) の一部として実施された.

## 【参考・引用文献】

- 1) Warren, S. G., 1982: *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 67–89, doi:10.1029/RG020i001p00067.
- 2) Tanikawa, T., *et al.*, 2006: *Appl. Opt.*, **45**(21), 5310–5319, doi:10.1364/AO.45.005310.
- 3) Aoki, T. *et al.*, 2007: *Remote Sens. Environ.*, **111**, 274–290, doi:10.1016/j.rse.2007.02.035
- 4) Domine, F. *et al.*, 2006: *Cold Reg. Sci. Tech.*, **46**, 60–68, doi:10.1016/j.coldregions.2006.06.002.
- 5) 成田英器, 1969: *低温科学, 物理篇*, **27**, 77–86.
- 6) 成田英器, 1971: *低温科学, 物理篇*, **29**, 69–79.
- 7) Arakawa, H., *et al.*, 2009: *Cold Reg. Sci. Tech.*, **59**, 163–168, doi:10.1016/j.coldregions.2009.07.004.
- 8) Kaempfer, T. U. and Schneebeli, M., 2007: *J. Geophys. Res.*, **112**, D24101, doi:10.1029/2007JD009047.
- 9) Martzl, M. and Schneebeli, M., 2006: *J. Glaciol.*, **52**, 558–564, doi:10.3189/172756506781828412.
- 10) Gallet, J. -C., *et al.*, 2009: *The Cryosphere*, **3**, 167–182, doi:10.5194/tc-3-167-2009.
- 11) Legagneux, L., *et al.*, 2002: *J. Geophys. Res.*, **107**(D17), 4335, doi:10.1029/2001JD001016.
- 12) 八久保晶弘ほか, 2012: *北海道の雪氷*, **31**, 45–48.
- 13) Hachikubo, A., *et al.*, 2013: *Proceedings International Snow Science Workshop*, 7-11 October, 2013, Grenoble, France, 73–77.
- 14) Hachikubo, A., *et al.*, 2014: *Bulletin of Glaciological Research*, **32**, in press.
- 15) Domine, F., *et al.*, 2007: *J. Geophys. Res.*, **112**, F02031, doi:10.1029/2006JF000512.