

**積雪比表面積の測定**  
**—スラッシュ粒子の測定例—**  
**Measurement of specific surface area of snow**  
**— Examples of slush particles —**

八久保晶弘, 矢作大輔 (北見工業大学),  
 山口悟 (防災科学技術研究所), 青木輝夫 (岡山大学)  
 Akihiro Hachikubo, Daisuke Yahagi, Satoru Yamaguchi, Teruo Aoki

## 1. はじめに

積雪の比表面積 (SSA) は, 積雪粒径に変わる重要な観測項目として認知されつつある. その理由として, SSA は非球形積雪粒子に対する光学的に等価な積雪粒径の指標であること, その結果, 近赤外領域の積雪アルベドが積雪粒径, すなわち SSA と強い相関があること, SSA は積雪の変態過程を記述する客観的指標であること, 旧来の目視観察による積雪粒径データには分布幅があること, また積雪粒径の測定値は観測者によってしばしば異なること, などが挙げられる. 分布のある積雪粒径とは異なり, SSA は真値が一つであるため, 積雪の複雑さを表現するパラメータとして理想的である. しかしながら, その測定方法については積雪の片薄片断面から画像解析で求めるなど<sup>1,2)</sup>, 古くから試みられてきたものの, 手間がかかるため普及しなかった.

SSA 測定技術が実用のレベルに達したのは最近のことである. 市販品である IceCube は, 近赤外領域での積雪試料の反射率を求める光学的手法を基礎としており, 測定手順は容易, かつすばやく測定が可能である. フィールドにおける測定では, これらの利点は極めて大きく, 今後はこのタイプが SSA 測定法の主流になるとみられる.

一方で, IceCube といえども万能ではない. 原理的には, 積雪 SSA を直接求められるわけではないため, 既知の SSA 試料を用いた校正が必要である. IceCube の校正で使用されるメタン吸着法 (BET 法) は, 液体窒素温度下で積雪試料表面に吸着させたメタンガスの吸着量から SSA を求める手法であり, フランスの研究グループにより考案されたものである<sup>3,4)</sup>. ガス吸着法では, 試料表面へのガス吸着量とガス分子占有面積との積で試料の表面積を求めるため, 光学的手法に対してより直接的に SSA を計測可能な測定手法, と言える. また, 吸着ガス (クリプトン, キセノン, 窒素など) の変更まで考慮に入れば, 原理的には直径数 mm の粒子 (SSA が  $10^0$  [ $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ] のオーダー) からシリカゲルのような直径 10 nm 程度の細孔 (同  $10^5$  [ $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ] のオーダー) まで, 極めて広い測定レンジを有する. 著者の開発した SSA 測定装置はメタン吸着式であり, 氷球試料を用いた測定によって 3–350 [ $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$ ] の広範囲で実用的であることが示されている<sup>5)</sup>. 本装置の仕様と応用例については, 既報<sup>5-8)</sup>を参照されたい.

積雪の SSA は, 降雪直後の新雪からこしまり・しまり雪化 (等温変態過程), こしもぎらめ・しもぎらめ雪化 (温度勾配過程), あるいはぎらめ雪化 (融解再凍結過程) を経て減少していく. 本研究ではこのうち, 一定温度環境下における SSA 減少過程に焦点をあてる. 2014 年から継続して測定を続けている, 積雪試料の等温変態過程による SSA 減少過程の測定例に加え, しまり雪に加水して作成したスラッシュ中の積雪粒子の肥大化過程にも注目し, 遠心分離機で脱水した積雪粒子の SSA 減少過程を追った例についても紹介する.

## 2. 試料採取および測定方法

北見工業大学の構内において、2014年1~3月の計3回、顕著な降雪イベント直後の新雪が採取されており、226 K, 243 K, 254 Kの3種類の温度下で断熱箱に保存されている。これらの試料について、定期的（毎年4月頃）にSSA測定が実施されている。測定時には、30 mL耐圧容器に試料を取り、液体窒素温度下で真空引きした後、メタン吸着法（BET法）により試料のSSAを測定した。

また一方では、低温室で約5年間保存されたしまり雪（SSA: 14.0 [m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>])に273.2 Kの水（氷水の液体部分のみ）を加えてスラッシュ状態にした試料を氷点環境下で保存し、定期的に遠心分離機で完全に脱水し、氷粒子のみの状態でSSAを測定した。このスラッシュ粒子の測定は、2018年3月の北見の外気温が0 °C近辺の時期に実施された。試料は二重の断熱箱に保存し、箱の外側には定期的にぬれ雪を補充することで氷点環境を保った。また、試料の取り出しと脱水過程については、融解や凍結の影響を極力避けるために、外気温がほぼ0 °Cの時間帯に実施された。遠心分離機を用いた脱水の効率について、脱水後の試料の重量含水率を秋田谷式含水率計で検証した結果、0 ± 1%の範囲にあり<sup>9)</sup>、粒子間に懸垂する液体水はほぼ取り除かれていることを確認した。

## 3. 測定結果および考察

まず、スラッシュ粒子のSSAの時間変化について図1に示す。0 °Cの水に浸ったしまり雪粒子は、わずか5時間でSSAは元の値の約半分である6.9 [m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>]まで急激に低下した。そこからはSSAはゆるやかに減少し、約1週間後には2.5 [m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>]まで低下した。SSA測定のたびにスラッシュ粒子を顕微鏡観察したところ、粒子は球体ないし楕円体の形状であり、時間とともに粒子

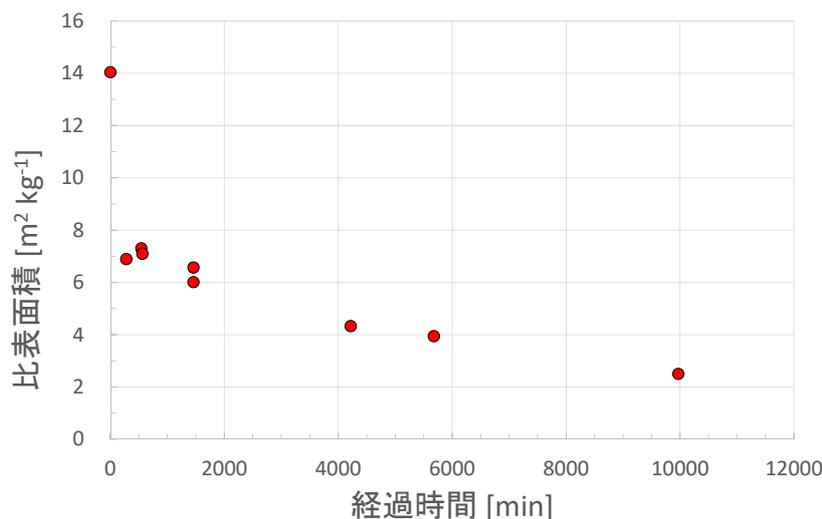


図1 スラッシュ粒子の比表面積の時間変化。スラッシュ粒子は測定のたびに遠心分離機で脱水している。

が明らかに肥大化していた（図2）。なお、試料の温度管理上の問題により、実験開始から166時間後が最後の測定となった。

次に、このスラッシュ粒子の測定例と併せて、等温変態過程における積雪粒子のSSA減少過程を図3に示す。試料A~D, 試料G~I, 試料J~Lの3群はそれぞれ同時期の降雪試料であり、さらに3種類の温度下で保存されているものである。横軸を対数でプロットした図3では、これらの氷点下の9試料は最初の100時間~数100時間程度の間は変化がゆるやかであるが、その後は指数関数的に減少し、そしてまた変化がゆるやかになる、逆S字のカーブを描いている。

氷粒子の焼結過程を詳細に検討したLegagneuxほか<sup>10)</sup>によれば、等温変態過程の積雪SSAの変化は(1)式で表わされる。

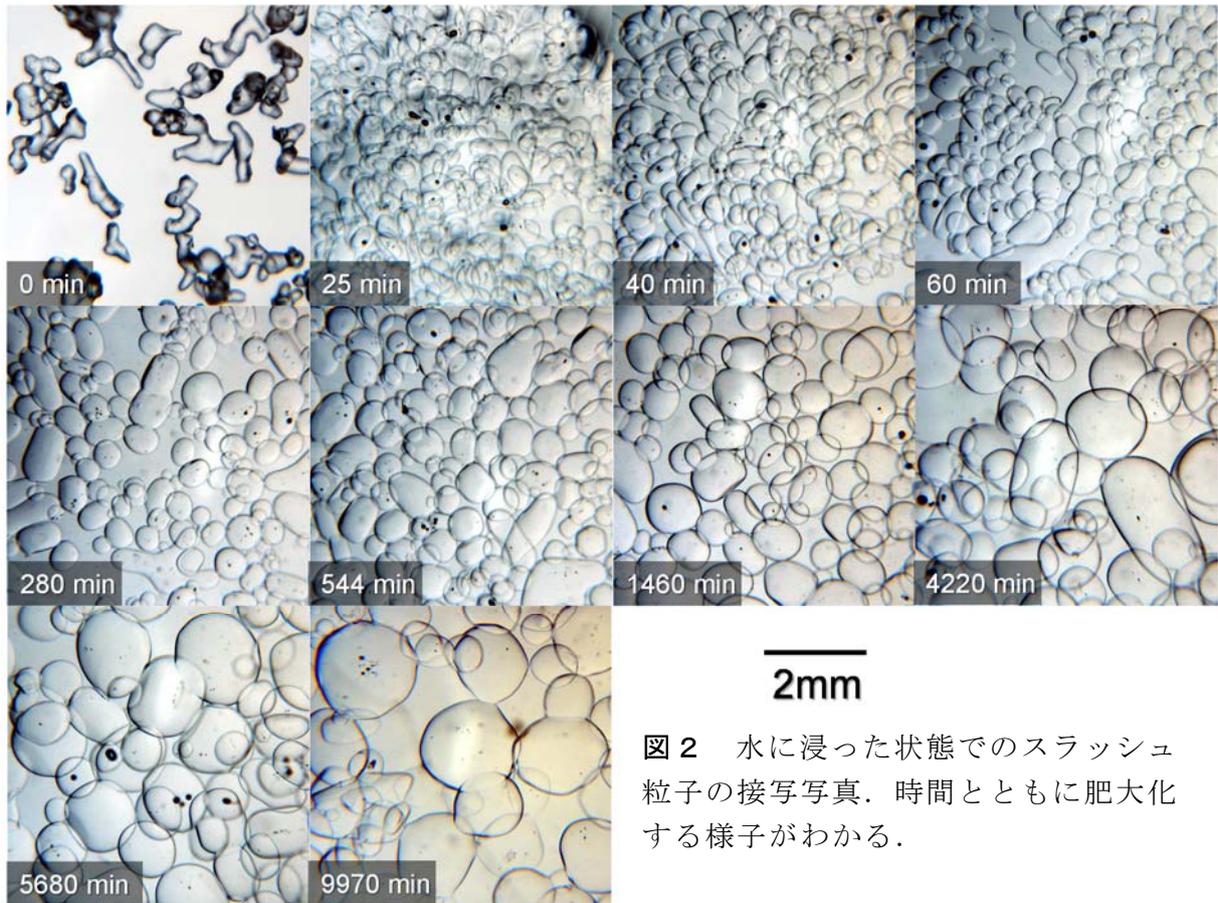


図2 水に浸った状態でのスラッシュ粒子の接写写真. 時間とともに肥大化する様子がわかる.

$$SSA = SSA_0 \left( \frac{\tau}{t+\tau} \right)^{1/n} \quad (1)$$

$SSA_0$ は  $SSA$  の初期値であり,  $\tau$  と  $n$  はフィッティングパラメータである. 図3中の実線および破線は, (1)式でフィッティングした結果であり, 逆S字のカーブをおおむね再現しているように見える. 試料A~D, 試料G~I, 試料J~Lの  $SSA_0$  はそれぞれ,  $74 \pm 10$  [ $m^2 kg^{-1}$ ],  $68 \pm 3$  [ $m^2 kg^{-1}$ ],  $58 \pm 2$  [ $m^2 kg^{-1}$ ]であり, これらの値は降雪時の粒子の  $SSA$  を表わしている. その他のパラメータについては,  $n$  は 226 K, 243 K, 254 K でそれぞれ,  $4.4 \pm 1.3$ ,  $3.6 \pm 0.4$ ,  $3.5 \pm 0.4$ , と低温につれて増加する傾向がみられた. しかしながら,  $\tau$  は  $n$  と同様に, 低温下で増加する傾向が認められる反面, 試料Lの  $\tau$  のみ桁違いに大きかった. 図3中の試料Lは1000時間近くまで  $SSA$  が初期値から大きく変わらず, 初期状態である降雪結晶の形状等が関係している可能性もある.

氷点下で保存された試料A~Lの積雪試料は, その中でも高温の254 K, 243 Kで数1000時間あたりから次第に  $SSA$  減少速度が緩やかになってきているとはいえ, 図3から推測するに,  $SSA$  は10万時間(約11年)が経過してもなお, 減少傾向である可能性が高い. その一方で, より高温であれば積雪内の水蒸気圧(ほぼ飽和水蒸気圧と考えられる)は高くなり, 焼結を引き起こす水蒸気輸送が活発になると考えられる. すなわち, 保存温度が高い場合, 図3で表わされる  $SSA$  の時間変化カーブが最終的にどのようになるのか, を見通せる可能性が高い.

脱水したスラッシュ粒子は, 氷の融点である273.2 Kで保存された, 最も高温状態で維持された積雪試料と言える. 現段階では, 氷点下で保存された試料と同様にフィッティングを施すにはデータが少なく, 確かなことは言えないが, 氷点下保存試料と比較し

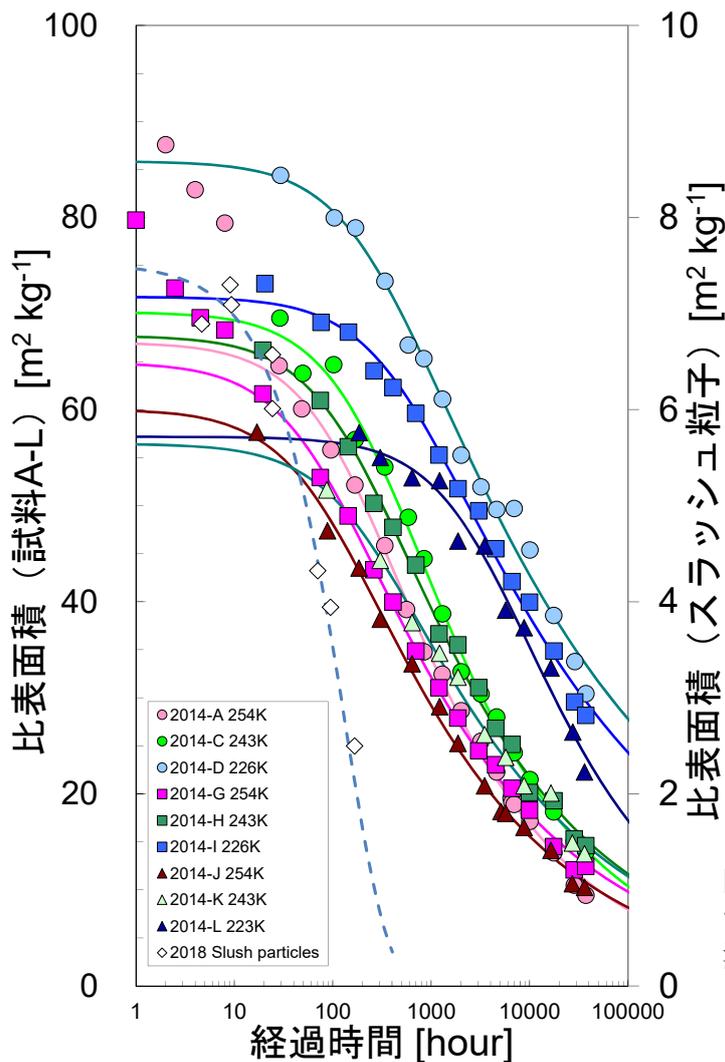


図3 等温変態過程における雪粒子（氷粒子）の比表面積減少の様子。

て、SSAの減少速度は明らかに、桁違いに大きい。また、1000時間程度でSSAはゼロに近づくようにも見える。仮に1年程度のスラッシュ試料の長期保存が可能であれば、融点における固液境界と氷点下での気固境界の違いはあるものの、(1)式の妥当性検証および適用範囲に関する考察が可能となる。今後は、融点直下の各温度における積雪SSA減少速度の測定を試みる予定である。

【参考・引用文献】

- 1) 成田, 1969: 低温科学, 物理篇, 27, 77-86.
- 2) 成田, 1971: 低温科学, 物理篇, 29, 69-79.
- 3) Hanot and Domine, 1999: Environ. Sci. Technol., 33, 4250-4255.
- 4) Legagneux et al., 2002: J. Geophys. Res., 107(D17), 4335, doi:10.1029/2001JD001016.
- 5) 八久保ら, 2015: 北海道の雪氷, 34, 15-18.
- 6) 清水ら, 2014: 北海道の雪氷, 33, 117-120.
- 7) 八久保ら, 2014: 北海道の雪氷, 33, 121-124.
- 8) 太田ら, 2016: 雪氷, 78(5), 281-290.
- 9) 八久保ら, 2017: 雪氷研究大会 (2017・十日町) 講演予稿集, P2-40.
- 10) Legagneux et al., 2004: J. App. Phys., 95, 6175-6184.