比表面積測定法に関する諸問題

—試料のタンピングおよび含水の影響に関する考察—

Some issues for measuring specific surface area of snow — Effect of tamping and water content of snow samples —

池浦 有希[1]，八久保 晶弘[1]，山口 悟[2]，青木 輝夫[3]
Yuki Ikeura[1], Akihiro Hachikubo[1], Satoru Yamaguchi[2], Teruo Aoki[3]
Corresponding author: hachi@mail.kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

積雪比表面積（SSA）を光学的手法（例えば IceCube などの市販装置）で測定する際，場合によっては試料を専用容器にタンピング（締固め）する場合がある．この時，積雪粒子が壊れたりくっついたりして SSA が変化する可能性がある．本研究では，タンピングによる SSA の変化について，ガス吸着式装置（BET 装置）および IceCube を用いて調べた．また一方では，IceCube の SSA 値に及ぼす試料の含水効果について，ガス吸着式装置による SSA 値と比較し考察した．

１．はじめに

積雪粒径（積雪粒子の粒径）は，積雪アルベドと密接な関連がある．しかしながら，積雪粒径には分布があり，ルーペ等を使用した目視観察においては，測定者によって値にばらつきが出てしまう．しかも，積雪粒子は雪質によって様々な形状であるため，粒子のどの部分を粒径の代表値として測定すべきか，の指針が定まっていない．このように，積雪粒径は測定しやすい物理量ではあるものの，その後の取り扱いが困難である．

一方，粒径に対して比表面積（Specific Surface Area: SSA），すなわち「単位質量あたりの試料の表面積」という考え方がある．SSA には積雪粒径のように分布がなく，ある試料の SSA の真値は一つである．そして，積雪 SSA はアルベドとの相関が高い，との認識が一般的に浸透してきた．ゆえに，積雪粒径よりも積雪 SSA の重要性が相対的に大きくなってきた，と言える．

現在，市販装置である IceCube[1)]による積雪 SSA 測定が主流になりつつある．IceCube 内には積分球があり，上部に近赤外線のレーザー光源，側面にセンサがある．また，積分球の下部に試料容器を収める開口部がある．測定時には，レーザー光源から試料容器に近赤外線を当て，その反射率を測定することで，間接的に SSA を求めている．

IceCube の特徴としては，短時間で比較的容易に測定可能なことが挙げられる．しかしながら，近赤外領域での吸収率から間接的に積雪 SSA を見積もる方法であり，真に正しい SSA 値が求められているかどうかを確認する方法がない．つまり，メーカーによる初期校正を信じるしかない．

一方，我々の研究グループで開発したガス吸着法を測定原理とする積雪 SSA 測定装置（BET 理論を基礎としており，簡便のため以降は BET 装置と表現する）は，吸着ガスであるメタンが積雪試料の表面に吸着した量を見積もり，メタンの分子占有面積との積によって積雪 SSA を求めることができる．図 1 に BET 装置の概略図を示す．装置本体は大型のノート PC 程度であり，IceCube

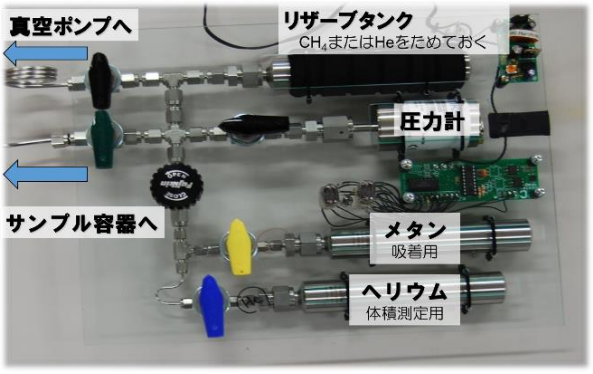

図 1　比表面積測定装置

[1] 北見工業大学
Kitami Institute of Technology
[2] 防災科学技術研究所
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience
[3] 国立極地研究所
National Institute of Polar Research

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice

と比較してコンパクトさに遜色はない. 測定誤差は 3%程度であり [2], 同 10%の IceCube と比較すると格段によい. ただし, フィールド調査では調達しにくい液体窒素を使用し, 真空ポンプの動作に商用電源が必要, との欠点を有する. また, IceCube と比較して測定に時間がかかる（1 試料あたり約 1 時間）という問題点がある.

IceCube のマニュアルによれば, IceCube の校正にはガス吸着法が使用されている. すなわち, 正しく校正された IceCube の使用が, 測定の手軽さ等の理由で積雪 SSA 測定の最適な選択となる. しかしながら, IceCube には測定上のいくつかの問題がある.

IceCube の測定可能温度範囲は, マニュアルによれば-40℃から-5℃の範囲である. これは「ぬれ雪の SSA は測定できない」ことを暗に示唆する. とすると, 本州の平地の積雪の大半は測定対象外であり, また海氷上の積雪は氷点下であっても塩分効果で液体水を含むことがあり, 注意を要する. そもそも, IceCube でのぬれ雪の SSA 測定値はどうなるのか, についてはよくわかっていない. これに対し, BET 装置は試料がぬれていても液体水を凍結させて測定することになるため, 氷表面と水の表面を合わせた比表面積を求めることになる. また, 脱水すれば液体水を除いた氷粒子（雪粒子）部分のみの比表面積となる [3]. そこで, 両者の装置の比較によって, IceCube でぬれ雪の SSA を測定するとどうなるか, を調べた.

また一方では, 試料が低密度の新雪の場合, IceCube では光学的距離が不足するため, 200 kg m^{-3} 程度までのタンピング（圧密）がマニュアルでは推奨されている. しかしながら, タンピングにより積雪粒子の破壊や結合が起こり, SSA が変化する可能性がある. そこで, 実験温度条件を-18～+5℃まで変化させながら, タンピング前後の積雪 SSA の変化についても調べた.

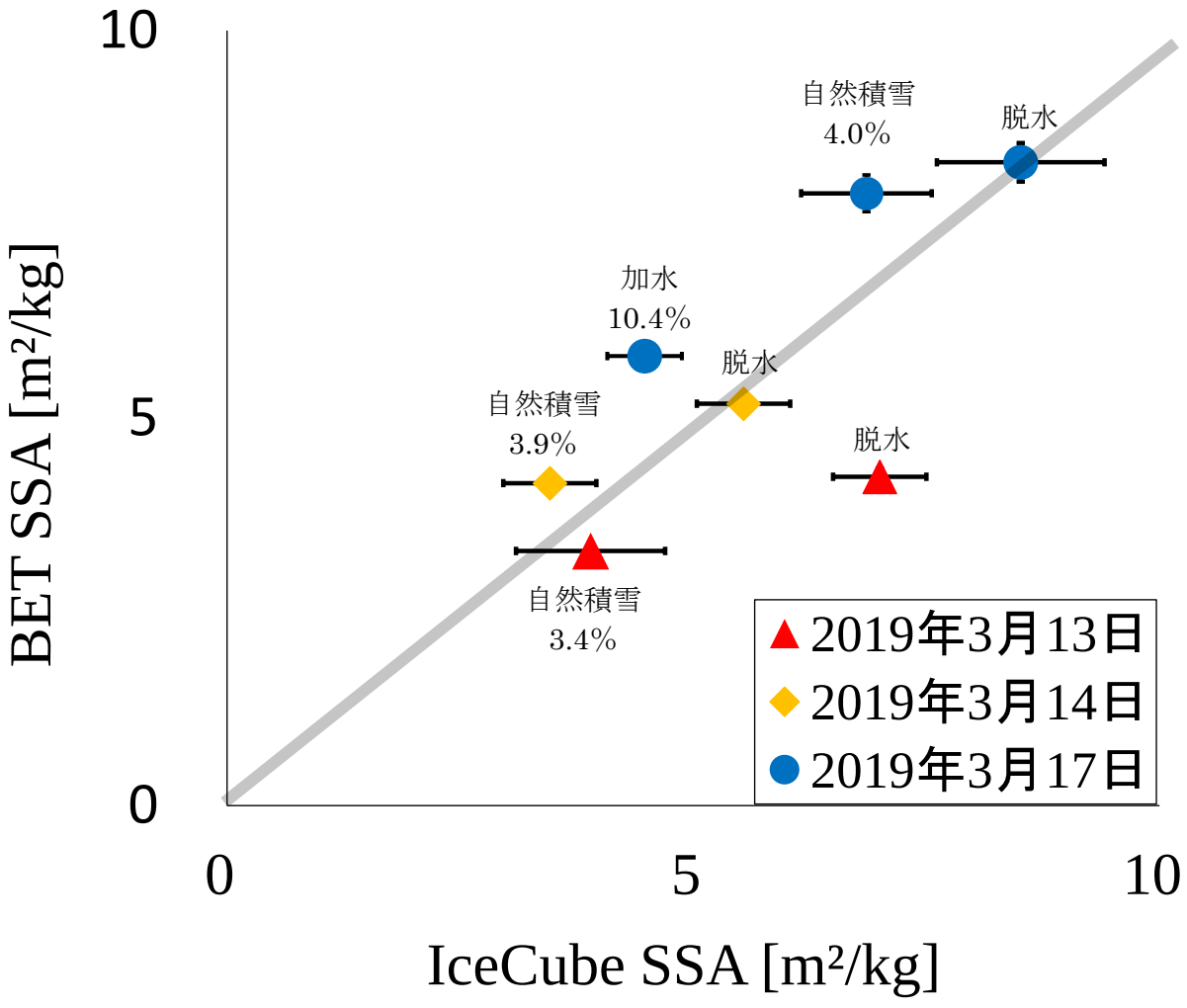

図 2　IceCube と BET 装置によるぬれざらめ雪およびその脱水試料の SSA の相関

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice

２．実験手法

（１）含水の影響

実験日（2019 年 3 月 13，14，17 日）ごとに異なるぬれざらめ雪試料の SSA を，IceCube と BET 装置でそれぞれ求めた．また，この試料を遠心分離機（5000 rpm，30 秒）で脱水した試料についても SSA を求めた．3/17 の試料のみ，0℃の水をスプレーで一様に散布し，よく混ぜることで含水率を増加させた試料も作成した．試料の含水率については秋田谷式含水率計で測定した．したがって，試料は以下の 3 種類となる．

①ぬれ雪状態の自然積雪試料（ぬれざらめ雪）
② ①を遠心分離機で脱水した試料
③ ①に 0℃の水をスプレーで加水した試料

（２）タンピングによる影響

いくつかの雪質（新雪，しまり雪，こしもざらめ雪，しもざらめ雪，ざらめ雪）について自然積雪を採取し，野外では外気温下でタンピングしない状態，およびタンピングした状態の試料について，IceCube および BET 装置で SSA を測定した．試料によっては，-18℃の低温室において測定を実施した．タンピングする際の気温については，サーミスタ温度計で測定した．

３．結果と考察

（１）含水の影響

IceCube と BET 装置による積雪 SSA 測定値の比較を図 2 に示す．図中の▲は 3/13 で気温-0.8℃，◆は 3/14 で気温 0.0℃，●は 3/17 で気温+0.8℃である．初期状態の雪質は，全てぬれたざらめ雪（自然積雪）であり，含水率はいずれも 3～4%程度であった．このぬれざらめ雪の SSA については，3/13 のデータを除いて，IceCube による SSA は BET 装置による SSA よりも若干小さめになっている．ここで，脱水操作により含水率が 0%となった試料の SSA に着目すると，これも 3/13 のデータを除いて，IceCube・BET 装置ともに SSA 値はほぼ等しかった．また，3/17 の試料では初期状態から加水により含水率を増加させたところ，含水率は 10%近くまで増加し，IceCube・BET 装置ともに SSA 値は同程度の低下がみられた．

図 2 中の自然積雪および脱水状態の 2 点を結ぶ直線の傾きは，両軸の 1 : 1 の線（図中の灰色の線）の傾きと比較すると，いずれの試料も小さくなっている．そして，脱水状態のぬれざらめ雪は，ざらめ粒子間で懸垂している液体水が全て取り除かれ，曲率の小さい氷の表面（例えば粒子間

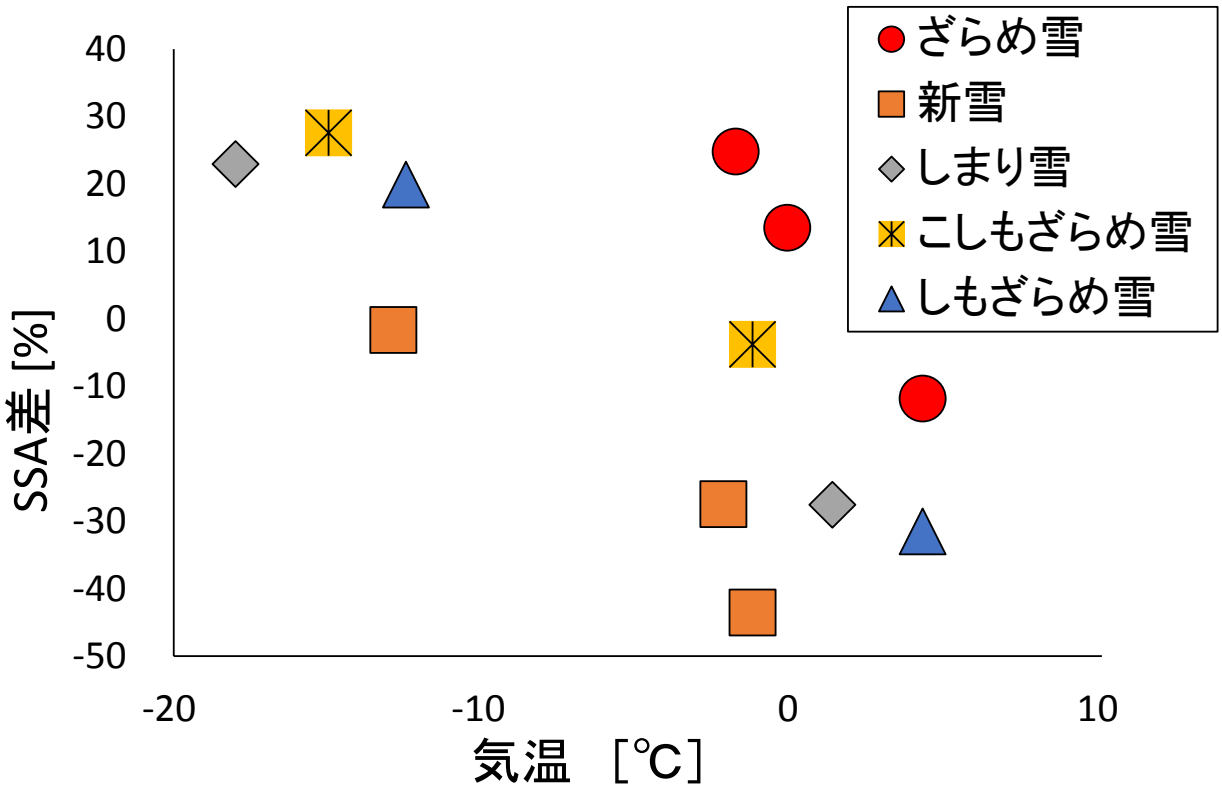

図３　気温（測定準備の際の試料温度）とタンピング前後の SSA 変化との関係

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice

のくびれ部分）も露出した状態であり，また含水していなければIceCubeもおおむね正しく測定できていると考えられる．

BET 装置が自然積雪状態のぬれざらめ雪のどの部分を測定しているか，について考察する．BET装置では，試料容器を液体窒素温度にした上で測定するため，ざらめ粒子間で懸垂している液体水もほぼ瞬間的に凍結している．すなわち，ざらめ雪粒子の表面に液体水が覆った状態の SSA を測定していることになる．したがって，脱水前の自然状態の SSA は脱水後の SSA より必ず小さい．これを「ぬれざらめ雪の真の SSA 値」であるとすると，IceCube は図 2 に示すように，いずれも過小評価していることになる．その理由としては，粒子間に懸垂する液体水が光学的により「黒く」みえることにより，近赤外領域の反射率を過小評価していることが考えられる．

（2）タンピングによる影響

試料を準備した際の気温とタンピング前後のSSA変化との関係を，雪質ごとに整理して図3に示した．なお，この結果は BET 装置のみで測定されたデータである．縦軸は，正の値であればタンピング後にSSAが増加し，負の値であればSSAが減少したことを示す．

まず，気温が低い場合の新雪の結果に着目すると，タンピング前後の SSA 差は-2%であり，新雪はタンピングによる影響をほとんど受けないことがわかる．その一方では，融点直下ではタンピングにより SSA が 3～4 割ほど減少していた．他の雪質をみていくと，気温が低い場合，しまり雪・こしもざらめ雪・しもざらめ雪はタンピングによりSSAが逆に2～3割ほど増加している．ただし，気温が 0℃近辺では新雪と同様，SSA は減少傾向にあった．ざらめ雪は例外的で，融点直下でもタンピングによりSSAは1～2割ほど増加しているが，さらに高温環境下（0℃以上）では減少に転じた．

全ての雪質で共通する点は，温度が高くなるとタンピングにより SSA は減少する傾向である．また，低温環境下で SSA が増加するのは，タンピングにより積雪粒子を破壊したため，破断面が表面積の増加に寄与したと考えられる．ただし，もともと SSA の大きい新雪では相対的にこの効果が小さく，SSA はほとんど変わらなかったとみられる．一方，高温環境下で SSA が減少するのは，タンピングにより積雪粒子同士がくっついて表面積が減少したため，と考えられる．ざらめ雪は積雪粒子が大きいため，他の雪質と比較して，0℃近辺でも積雪粒子の破壊による影響が相対的に大きかった，と考えられる．

【参考・引用文献】

1） Gallet, J.-C., Domine, F., Zender, C. S. and Picard, G., 2009: Measurement of the specific surface area of snow using infrared reflectance in an integrating sphere at 1310 and 1550nm, *The Cryosphere*, **3**, 167-182.

2） Hachikubo, A., Yamaguchi, S., Arakawa, H., Tanikawa, T., Hori, M., Sugiura, K., Matoba, S., Niwano, M., Kuchiki, K. and Aoki, T., 2014: Effects of temperature and grain type on time variation of snow specific surface area, *Bull. Glaciol. Res.*, **32**, 47-53.

3） 八久保晶弘，矢作大輔，山口悟，青木輝夫，2018：積雪比表面積の測定―スラッシュ粒子の測定例―，北海道の雪氷，**37**，15-18.

Copyright©2019 公益社団法人日本雪氷学会北海道支部
Hokkaido Blanch of the Japanese Society of Snow and Ice