

野外におけるガス吸着式積雪 SSA 測定装置の運用 Operation of the gas-adsorption type instrument for measuring snow SSA in a fieldwork

八久保晶弘 (北見工業大学), 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, Satoru Yamaguchi, Masahiro Hori, Tomonori Tanikawa, Konosuke
Sugiura, Sumito Matoba, Masashi Niwano, Katsuyuki Kuchiki, Teruo Aoki

1. はじめに

積雪アルベドは積雪粒子の粒径および不純物濃度に依存し、特に近赤外領域では積雪粒径の効果が大きいことが知られている¹⁾。野外における従来の積雪粒径測定方法は、ルーペと粒度ゲージを用いた目視観察が主体であるが、積雪粒子の粒径の定義は明確ではない。我々の研究グループが実施している積雪断面観測では、従来方式の粒径に相当する積雪粒子の長径を d_1 とし、また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 d_2 として、これらの最大値、最小値、中央値を各積雪層ごとに記録している。これまでの研究^{1,2)}により、 d_2 は光学的粒径（光学的に等価な粒径）に近いとされている。このことから、 d_2 は粒径を代表する観測可能なパラメータとして用いられてきたが、積雪粒径には分布があるために、 d_2 の測定値は観測者間でばらつきが生じる。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、と認識されてきた。

こうした積雪粒径に代わるパラメータとして、積雪の比表面積 (Specific Surface Area, 以後 SSA) が近年注目されている。比表面積は単位質量ないし単位体積当たりの表面積で定義され、積雪粒子表面での多重反射が本質である積雪アルベドとは密接な関連がある。値に幅のある積雪粒径に対し、積雪 SSA はただ一つの真値が存在するため、積雪アルベドを表わすパラメータとして期待される。積雪 SSA を測定する手法としては、片薄片から 2 次元断面を、また MRI や X 線 CT で 3 次元構造を得て画像解析を行なうなどの方法があるが、いずれも低解像度という問題をはらんでいる。我々は 2011 年からガス吸着式積雪 SSA 測定装置を開発してきた³⁻⁶⁾。本報では、測定装置の改良点や測定性能、現在も残る問題点等について、野外での運用の観点からまとめる。

2. 吸着ガスの選定

ガス吸着法を積雪 SSA 測定に応用する研究は、2000 年前後にフランスの研究グループによって始められた⁷⁻¹⁰⁾。単分子層吸着量を求めるための BET 理論は、多孔質体の SSA 導出に広く用いられており、通常は窒素を吸着ガスに用いる。しかしながら、窒素は SSA が 10^4 – 10^5 [m^2kg^{-1}] のオーダーの試料に向いており、SSA のオーダーが 10^0 – 10^2 [m^2kg^{-1}] である積雪試料に適用すれば、測定誤差との戦いとなる。SSA の測定可能範囲を決定するのは、測定温度における吸着ガスの蒸気圧である。氷は昇華圧の高い物質であることから、測定温度は可能な限り低いことが望ましく、また SSA が比

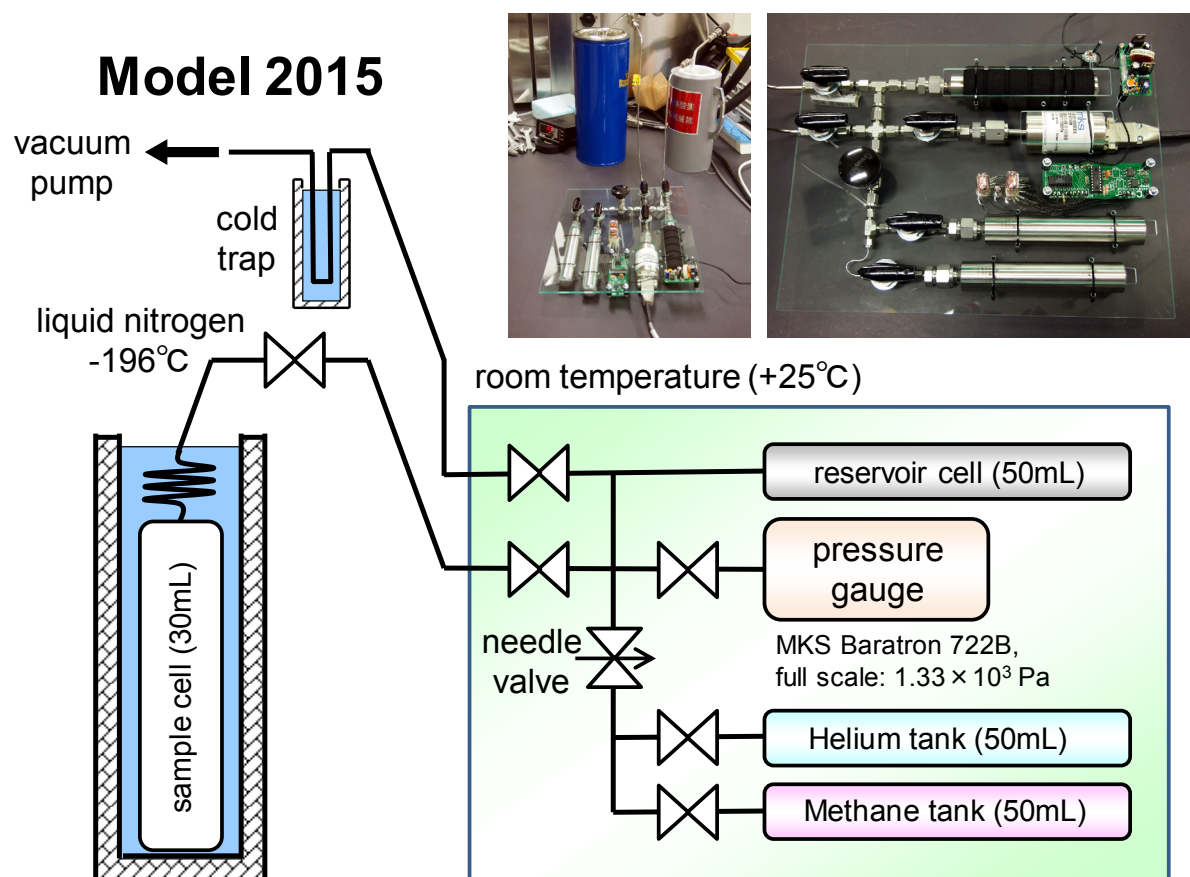


図 1 ガス吸着式積雪 SSA 測定装置（8 号機）とシステム構成図

較的小さい積雪では吸着量を容易に検出するために吸着ガスの蒸気圧は低いほうが有利となる．液体窒素温度で 1294 [Pa]であるメタンの蒸気圧¹⁰⁾は，積雪 SSA の測定に最適であり，我々もメタンを採用している．

他のガスでは，液体窒素温度で蒸気圧が 350 [Pa]のクリプトンを試したが⁴⁾，安定した吸着等温線が得られにくい．一方，メタノールの融点である約-100℃でノルマルブタンを試したが，そもそも吸着自体がうまくいかない．これらのガスで不具合が生じる原因は不明である．野外での液体窒素入手の困難さを考え，氷と NaCl の共晶点 (-21.3℃)でノルマルヘキサンを試したが^{3,4)}，この温度では氷の昇華圧が無視できず，測定値の信頼性に関わる．結論として，メタンが最適な吸着ガス，ということになるが，液体窒素の調達が必須であり，野外での運用に大きな制約をもたらしている．

3. 測定装置および測定系の技術面

2011 年にプロトタイプが完成して以来，現在は 6～9 号機が現役で稼働中である．これらの基本設計はほぼ同じであり（図 1），4 号機までのモデルは試作機に位置づけられる．装置性能に影響する重要な点の一つに，配管内径とその長さが挙げられる．現在のモデルは主要配管に外径 1/8 inch の SUS 管を使用し，配管の長さを可能な限り短くしている．1 号機では外径 1/4 inch，2 号機では外径 1/16 inch の SUS 管を使用した，前者では配管の自由度がなく，後者では測定時の圧力の読み取り値が安定せず誤差が大きかった．

本装置は中真空（100–0.1 [Pa]）領域で操作するため，低圧時にはガスの流れが分子

流に近づくこと，また試料容器（液体窒素温度）と装置本体（常温）との間の熱遷移（thermal transpiration）問題により，吸着後の圧力低下をうまく測定できていない可能性がフランスの研究グループより指摘されていた．熱遷移の効果を見積もったところ，最悪の場合でも積雪 SSA 測定値は 1.7% の過小評価に留まり，装置そのものの再現性（3%）よりも小さい，との結論を得た．

一方では，積雪試料容器のシール方法，すなわちパッキンの選択が問題となった．試料容器は，一定量の積雪試料をスムーズに入れることができ，かつ密封可能で，液体窒素温度から常温近くまでの温度変化にも耐える必要がある．我々は耐圧硝子工業製のステンレス製ポータブルリアクター TVS-N2 型（容積 30mL）を選択した．耐圧容器に通常用いられるテフロンパッキンでは，ステンレスとの熱膨張率の違いが原因で，液体窒素温度まで冷却するとシールが破れる．本製品では本体と組成のほぼ同じステンレスパッキン（炭素含有量の違いでわずかに柔らかい）が選択でき，またパッキンの取り扱い次第では 100 回を超える再利用が可能であることを確認している．

4. 測定装置の利点および欠点

フランスの研究グループの装置と比較すると，装置占有体積はかなり小さく，縦 40cm×横 50cm×高さ 30cm 程度の大きさに全てが収まる．フランスの研究グループは大型のターボ分子ポンプを使用しているのに対し，我々の装置では小型油回転真空ポンプ（GHD-031, ULVAC）を使用しており，到達圧力は 0.07 [Pa] であるため，SSA 測定には支障をきたさない．測定に必要なガス類も予め本体のタンクに入れておくため，現場でのガスボンベ等の調達は不要，約 100 試料分の連続測定が可能である．

一方，液体窒素の使用はもっとも大きな欠点である．使用量は 1 日あたりの測定数にも依存するため一概には言えないが，2014 年の中札内村における 6 日間の測定⁵⁾では，試料冷却・運搬・測定・真空ポンプ用トラップ等の全用途で約 35L を消費し，計 24 試料の SSA 値を得た．すなわち，1 データあたり 1.5L 程度を消費した計算となる．また，真空ポンプの運用には商用電源が必要であり，起動時のモーターには大電流が必要なため，例えば極地観測で使用される太陽光発電では電力的に厳しい．したがって，真の意味における野外測定は困難であり，液体窒素および商用電源が確保できる簡易ラボが必須となる．野外での作業は試料サンプリング，試料容器への封入およびドライシッパー（ベーパーシッパー）を用いた液体窒素温度までの冷却作業である．現場で試料を固定し，簡易ラボまで輸送する．ドライシッパーは，液体窒素を内部に吸収させて 2 週間近くの冷却能力を持つタイプが市販されており，航空機等にも搭載可能なため，現場では試料を保存してラボに持ち帰る，という運用スタイルが現実的と思われる．

5. 他の積雪 SSA 測定手法との比較

近年，積雪 SSA を光学的に推定する手法が開発されている．既に市販されている IceCube (A2 Photonic Sensors, France)^{11,12)}は，波長 1,310 nm のレーザ光源を内蔵する積分球の一部を積雪試料で置き換えることにより，試料の反射率を測定する装置である．球形粒子を仮定した理論計算値に基づき，反射率から積雪粒径を計算し，これを球相当粒径として SSA が求められる．すなわち，ガス吸着式と比較して間接的手法であることは否めないが，測定を迅速に行なえる利点がある．

2015年2月に北海道中札内の自然積雪でガス吸着式積雪 SSA 測定装置と IceCube の比較測定を実施したところ、 $10-60 [\text{m}^2\text{kg}^{-1}]$ の範囲でよく一致した。ガス吸着式では、ラボに持ち帰ってから1試料あたり約1時間の測定時間を要するのに対し、IceCube では現場（野外）で運用でき、測定時間は1試料あたり数分程度であった。

5. 結言

我々は、2011年から開発してきたガス吸着式積雪 SSA 測定装置を実験室外に持ちだし、計100回以上の試料測定を行なってきた。現状として、メタンが積雪 SSA 測定に最適な吸着ガスであるため、吸着温度を保持するための液体窒素と真空ポンプ用の商用電源が必要となる。この2点が、極地等の野外観測では大きなネックとなっている。また、測定時間は1試料あたり1時間かかり、IceCube 等の光学系装置には到底かなわない。フィールドでの運用にはこのように制限はあるが、他の測定原理とは完全に独立しており、広いレンジで信頼性の高い SSA 値が得られるため、高 SSA 領域までカバーした光学系装置のキャリブレーション等に利用できると考えられる。

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23-26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 1-4」、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) Tanikawa, T., *et al.*, 2006: *Appl. Opt.*, **45**(21), 5310–5319.
- 2) Aoki, T. *et al.*, 2007: *Remote Sens. Environ.*, **111**, 274–290.
- 3) 八久保晶弘ほか, 2012: *北海道の雪氷*, **31**, 45–48.
- 4) Hachikubo, A., *et al.*, 2013: *Proceedings International Snow Science Workshop*, 7-11 October, 2013, Grenoble, France, 73–77.
- 5) 八久保晶弘ほか, 2014: *北海道の雪氷*, **33**, 121–124.
- 6) Hachikubo, A., *et al.*, 2014: *Bulletin of Glaciological Research*, **32**, 47–53.
- 7) Chaix, L. *et al.*, 1996: *C. R. Acad. Sci., Ser. IIa*, **322**, 609–616.
- 8) Hanot, L. and Dominé, F., 1999: *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 4250–4255.
- 9) Dominé, F., *et al.*, 2001: *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 4250–4255.
- 10) Legagneux, L., *et al.*, 2002: *J. Geophys. Res.*, **107**(D17), 4335, doi:10.1029/2001JD001016.
- 11) Gallet, J. -C., *et al.*, 2009: *The Cryosphere*, **3**, 167–182.
- 12) Zuanon, N., 2013: *Proceedings International Snow Science Workshop*, 7-11 October, 2013, Grenoble, France, 1020–1023.