

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：82102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560195

研究課題名(和文) 濡れ雪の比表面積測定手法の確立とそれを用いた非接触型の濡れ雪物性値測定技術の開発

研究課題名(英文) Investigation of methods for measuring specific surface area of wet snow

研究代表者

山口 悟 (Yamaguchi, Satoru)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員

研究者番号：70425510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：積雪の比表面積(SSA)は、雪質だけではなく粒径や粒子同士の結合状態の情報も持つ。従来の雪のSSAの測定方法は、乾いた雪のみを対象としており、濡れ雪のSSAの測定方法は確立されていない。本研究では、氷と水の光吸収率特性に波長依存性があることに着目し、複数の波長の反射率を組み合わせることで、濡れ雪のSSAの測定ができるかどうかに関する研究を行った。研究の結果、近赤外域の反射率(NIR)は、含水率()に強く依存すること、またその依存性は、波長によって異なることが示唆された。これらのことから複数の波長を組み合わせれば濡れ雪のSSAが測定できる可能性があることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The specific surface area (SSA) of snow is defined as its surface area per unit mass or volume. Because the SSA of snow includes information relating to the grain type, grain size, and connections among grains, it is a powerful parameter for quantifying the exchange of matter and energy between the snow and the atmosphere. Additionally, it is also an essential parameter for modeling mass transfer (air or water) in snow cover. Several methods are available to measure the SSA of snow, but they have only been applied to dry snow. In this study, we investigated the methods to measuring wet snow SSA using the linking multi-wavelengths with the difference in light absorption between ice and water. Our results indicated that the near-infrared reflectance (NIR) of snow strongly depends on its water content () and the dependency of NIR on changes with its wavelength. These results suggest the potential that wet snow SSA can be measured using the sources of multi-wavelength.

研究分野：雪氷

キーワード：湿雪 比表面積 近赤外域の反射率 ガス吸着法

1. 研究開始当初の背景

積雪の比表面積(SSA)は粒子の形状や大きさだけでなく粒子間の結合状態を表す物理量であるため、大気/雪の境界における化学物質の交換過程や積雪内部の空気や水の移動、それに伴う積雪に沈着した化学汚染物質の移動等のモデル化には不可欠の情報である。実際積雪モデル内で使われている乾いた雪の通気度は、密度と SSA の関数で表す (Colonne et al., 2012) のが最新の研究である。しかし日本の雪氷研究の分野においては、積雪の SSA に関する研究並びに測定方法に関してほとんど興味を持たれておらず、その結果、この分野において、ヨーロッパや北米などの雪氷研究から大きく出遅れていた。

このように積雪の SSA に関する測定は、ヨーロッパや北米などが中心となって行われてきたが、研究対象は乾いた雪であり、濡れ雪の SSA に関しては注目されてこなかった。一方、日本の豪雪地帯といわれる本州の日本海側は真冬でも積雪の大半が濡れている濡れ雪地帯である。また近年の温暖化に伴い、従来であれば冬期期間を通じて乾き雪の状態だった北海道などでも濡れ雪の状態が真冬にたびたび発生するようになって来ている。従って日本における雪氷環境下の現象(雪氷災害や気候変動)を精度よく予測するためには、濡れ雪内の空気や水などの物質の移動を精度よくモデル化する必要がある。そのためには、濡れ雪の SSA の情報が不可欠である。

また濡れ雪の SSA の測定手法が確立できれば、この研究分野において日本の雪氷研究の独自性をヨーロッパや北米の研究者にアピールすることが可能となる。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、濡れ雪の SSA の測定方法を確立することである。しかしそのためにはまず日本の雪氷研究のコミュニティ内で積雪の SSA の重要性に関する関心を高めるとともにその測定方法に関する情報を広める必要がある。そのために、濡れ雪だけではなく乾き雪も含めた積雪全体の SSA の測定方法および SSA の有効性を示す研究も視野に入れ、以下の4つのテーマに関して研究を行った。

① SSA の測定手法の比較

現存する積雪の SSA を測定する手法(雪氷用 μ -CT, ガス吸着法(BET 法), 近赤外反射法(NIR 法))を、さまざまな雪に適応することで、測定する雪の条件によって最適な SSA の測定方法を決定する。

② 複数の近赤外領域の波長における積雪の反射率(NIR)と物性値(密度, 含水率, 粒径等)の関係性を明らかにする実験

水と氷における近赤外域の光の吸収の割合には波長依存性がある事(図 1)に着目し、複数の近赤外領域の波長における NIR と積

雪の物性値との関係を明らかにする。

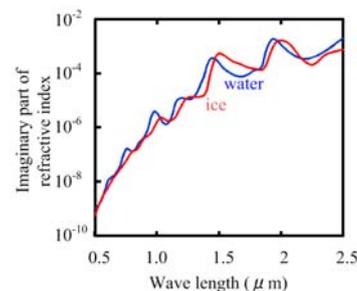


図 1 水と氷における近赤外域の光の吸収の波長依存性

③ ガス吸着法(BET 法)の改良

従来大がかりな施設を必要とし移動が困難であった BET 法の測定装置(Leganeux et al., 2002)を改良し、従来よりも安定且つ短時間での測定を可能とする装置を開発する。また濡れ雪にも対応可能とする。

④ 非接触型積雪物性(積雪比表面積)測定装置の試作機の開発

従来の積雪観測法(断面観測方法)だと、積雪の物性値を測定する断面(Pit)を掘るのに数時間から半日かかってしまう。本研究では、Pit を掘らないで積雪の特性を短時間で測定できる光学的積雪比表面積測定装置のプロトタイプを作成を行う。

3. 研究の方法

積雪の SSA の測定手法の比較実験は、防災科学技術研究所 新庄雪氷環境実験所にある低温室で行った。比較した測定方法は、雪氷用 μ -CT, BET 法, 複数の波長(900, 1050, 1150, 1290 nm)を用いた NIR 法である。それぞれの特徴をまとめると以下ようになる。

<雪氷用 μ -CT>

- ・測定時間：3-6 時間 (分解能に依存)
- ・必要設備：低温室
- ・電源：必要
- ・野外対応性：低温室の近くのみ
- ・特徴：雪粒子の細かい形状(数 - 数十 μ m)を測定可能

<BET 法>

- ・測定時間：1 時間
- ・必要設備：常温実験室
- ・電源：必要
- ・野外対応性：液体窒素運搬範囲
- ・特徴：分子レベルで SSA の測定が可能

<NIR 法>

- ・測定時間：20 分
- ・必要設備：遮断カーテン
- ・電源：不要(バッテリー駆動)
- ・野外対応性：可
- ・特徴：面的な SSA 分布を測定可能

比較実験においては、新庄雪氷環境実験所における樹枝状の人工雪（降雪 A），しまり雪並びにざらめ雪の 3 種類の雪質（図 2）を用いた。

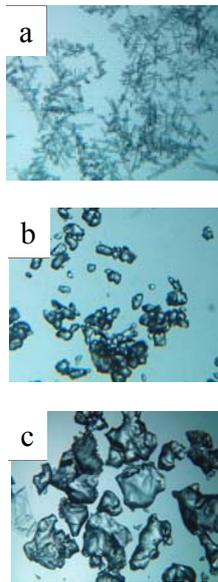


図 2 実験で使った雪質
a: 人工雪（降雪 A）
b: しまり雪
c: ざらめ雪

図 3 に NIR 法で用いたそれぞれの測定装置を示す。900 nm の測定に関しては近赤外域をカットするフィルターを取り除いたカメラ (Nikon D3S) に 840-940 nm の間の波長だけを通す干渉フィルター (X-Nite 850 nm Filter) をセットしたものを用いた。1050, 1150, 1290 nm の測定に関しては、それぞれの波長のみを通す干渉フィルター (日本真空光学株式会社製) を InGaAs カメラ (浜松ホトニクス製) につけて測定を行った。



図 3 NIR 法で使った機器
a: 900 nm 用装置
b: 1050, 1150, 1290 nm 用装置

図 4 に測定風景を示す。実験用の積雪サンプルは、新雪以外はふるいがけをすることで粒径をそろえた状態にし、サンプルケース (15cm(縦)x15cm(横)x30cm(高さ)) に入れた。最初に NIR による SSA の測定を行う (Yamaguchi et al., 2014)。本実験ではカメラの両脇に設置された二つのハロゲンランプを光源として使用することで、積雪サンプルに均一な光が当たるようにしている。なお積雪サンプルの正確な反射率を計算するために、積雪サンプルの周囲には反射率のわかっている reference target (反射率: 99%, 55%, 10%) を配置している。各波長別の NIR による測定を行ったあとに、BET法並びに雪氷用 μ -CT 用のサンプルを取得し、それぞれ測定を行った。その後得られたデータ同士を比較することで、各手法の評価を行った。



図 4 実験風景

複数の近赤外領域の波長における積雪の NIR と物性値 (密度, 含水率, 粒径等) の関係を明らかにする実験は、波長 900, 1050, 1150, 1290 nm で行った。そのうち 900, 1050, 1290 nm では、氷と水の光吸収率はほぼ同じなのに対し、1150 nm では氷と水の吸収率が異なっている (図 1)。サンプルケース (15cm(縦)x15cm(横)x30cm(高さ)) 内にふるいで粒径をそろえた雪試料を入れ、0°C の低温室に半日以上置くことで雪温を 0°C にし、まずは乾いた状態で各波長の反射率 (R_{before}) の測定を行う。なお測定装置の配置等は基本的に図 4 と同じである。測定後サンプルケースを 0°C の氷水につけることで、雪サンプル自体を一度水で飽和させ、その後水面をある一定の高さまで下げることで、高さ方向に様々な含水率のあるサンプルを作成し、その高さ別の反射率 (R_{after}) を測定する。NIR の測定後に、熱量式含水率計を用いて高さ別の含水率を測定することで、高さ方向の含水率 (θ) の分布を求め、反射率の変化 $\text{Ratio}(R_{\text{after}}/R_{\text{before}})$ と θ

の関係を求めた。

4. 研究成果

様々な手法（雪氷用 μ -CT, BET 法, NIR 法）で測定を行った SSA を比較した結果、新雪のような構造が細かい雪に関しては、BET 法で測定した SSA が最も信頼性が高いことが分かった(安達ほか, 2014)。雪の SSA を測定するのに一番適した波長を選ぶために、複数の波長(900, 1050, 1150, 1290 nm)について SSA と反射率との関係を調べた結果、すべての波長において、SSA が増加すると反射率が減少するという傾向が見られた(図 5)。なお相関係数についてもすべての波長でほとんど変わらなかった。

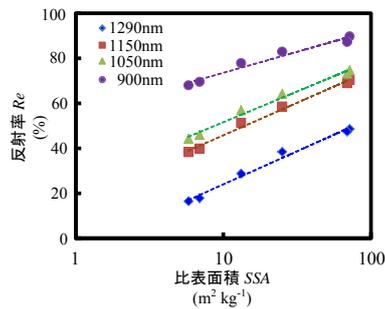


図5 比表面積(SSA)と反射率(Re)との関係の波長依存性

*SSAは雪氷用 μ -CTで測定

それらの結果を踏まえ、光学的積雪比表面積測定装置のプロトタイプを作成を行った(山口ほか, 2015a)。使用する波長に関しては、SSA と反射率との間の相関に関しては波長依存性が見られなかったことをふまえて、既存レーザー光の持つ波長 635nm 並びに 1310nm を使うことにした。なお実際の作成にあたっては、先行研究(Arnaud et al., 2011)を参考にするとともに著者らに相談しながら設計を行った。図 6a に作成したプロトタイプの全体写真を載せる。装置は大きく分けて、センサー部分、中継ボックス、ロガー部分の 3 つから成り立っており、それぞれがケーブルで繋がっている。図 6b に、センサー部分の拡大図を載せる。センサー部分の上下には、センサーを穴(ボアホール)に降ろしていった際にセンサーがふらつかないようにガイドがつけられている。光源 1 は波長 1310nm のレーザー、光源 2 は 635nm のレーザーとなっており、交互にボアホール内の側面に照射される。そこからの反射を Si-InGaAs フォトダイオードからなる受光部で取得し、反射率と SSA との関係式を用いて SSA に変換する仕組みとなっている。現在低温室において詳細な性能テストを行っており、その結果を基に今後さらなる改良を行う予定である。

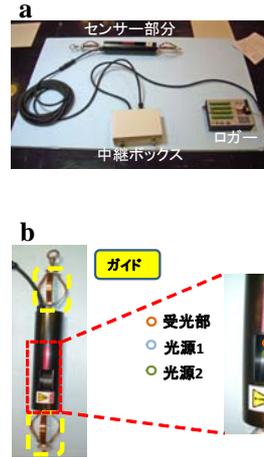


図 6 光学的積雪比表面積測定装置のプロトタイプ

- a. 全体写真
- b. センサー部分

濡れ雪の含水率の測定を非接触で行う手法を検討するために、低温室において人工的に積雪サンプルを作成し、乾いた状態並びに濡らした状態の各波長(1050nm, 1150nm, 1290nm)の反射率の変化を測定した(やまぐちほか, 2015b)。図 7 に、体積含水率(θ)並びに各波長における $\text{Ratio}(R_{\text{after}}/R_{\text{before}})$ を示す。なお図における θ は実測値ではなく Yamaguchi et al. (2010, 2012)の推定式から求めたものである。氷と水の光吸収率がほぼ一緒である 1050 nm 並びに 1290 nm では、 θ が小さい領域(<0.05)においても反射率は顕著な低下を示し、その減少の割合は同じ程度であったのに対し、水の光吸収率が異なる 1150 nm では、同じ領域内では反射率の減少はあまり見られなかった。一方 θ が大きくなる(>0.10)とすべての波長において反射率は急激に減少した。減少の割合は 1050 と 1290 nm はほぼ同じであるのに対し、1150 nm の方が急激である。これらの結果は体積含水率と反射率との関係には波長依存性があることを示している。このことは複数の波長を組み合わせれば、積雪の含水状態が非接触で測定できることを示唆している。

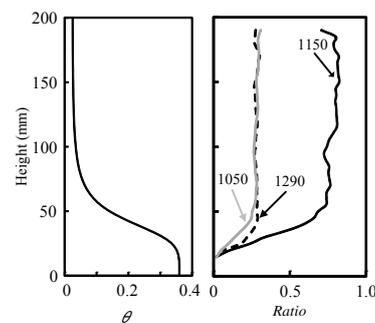


図 7 体積含水率(θ)並びに各波長における $\text{Ratio}(R_{\text{after}}/R_{\text{before}})$

BET法の装置の改良を行うことで、従来の装置と比べてより正確に且つ短時間で積雪の比表面積の測定が可能となった(八久保ほか, 2015a; 2015b; 2015c). また、従来は乾き雪のSSAの測定にのみ適用されていたBET法を、濡れ雪に適用するための改良も行い、実際に濡れ雪のSSAの測定を行い、BET法によって液体水部分のSSA減少効果を定量的に評価できることを明らかにした。さらに改良したBET法の装置を使い、従来測定が難しかった降雪直後のSSAの測定を行った結果、降雪粒子の落下速度-粒径の関係(CMF: Ishizaka et al., 2013)と、その降雪粒子の持つSSAの間には対応がありそうだということが分かった(図8)(Yamaguchi et al., 2015; 山口ほか, 2014; 2015c)。また初期密度との関係についても考察を行った(Ishizaka et al., 2016)。これらの成果により、現在予測が不可能である降雪粒子が原因となる表層雪崩の弱層形成をSSAという物理パラメータで表現するための道筋を作った。今後さらなる研究を続け、実際の雪崩予測に本研究の成果を反映させる予定である。

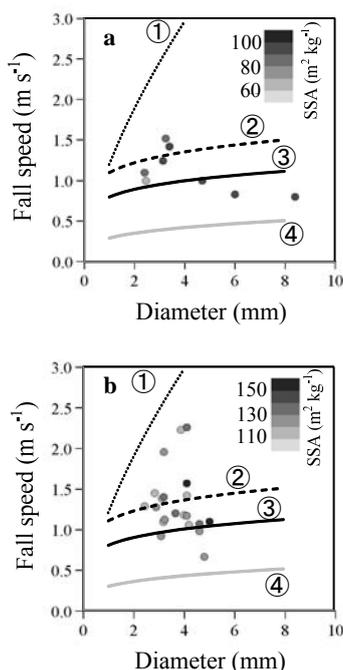


図8 CMFとSSAとの関係
a. $SSA < 110 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ の場合、
b. $SSA \geq 110 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$

- ①霰のCMF¹⁾
- ②濃密雲粒付雪片のCMF¹⁾
- ③雲粒なし雪片(樹枝状結晶)のCMF¹⁾
- ④雲粒なし雪片(立体樹枝状結晶)のCMF²⁾

*1) Locatelli and Hobbs, 1974
2) 梶川ほか, 1996

参考文献

(“5. 主な発表論文等”に挙げられているものは除く)

- Arnaud et al., 2011, Measurement of vertical profiles of snow specific surface area with a 1 cm resolution using infrared reflectance: instrument description and validation. *Journal of Glaciology*, **57**, 17-29.
- Calonne et al., 2012, 3-D image-based numerical computations of snow permeability: links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy, *The Cryosphere*, **6**, 939-951.
- Ishizaka et al., 2013. A New Method for Identifying the Main Type of Solid Hydrometeors Contributing to Snowfall from Measured Size-Fall Speed Relationship. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **91**, 747-762.
- Leganeux et al., 2002. Measurement of the specific surface area of 176 snow samples using methane adsorption at 77 K, *Journal of Geophysical Research*, **107**, 4335.
- Locatelli and Hobbs, 1974. Fall speed and mass of solid precipitation particles. *Journal of Geophysical Research*, **79**, 21885-2197.
- Yamaguchi et al., 2010. Water retention curve of snow with different grain sizes. *Cold Regions Science and Technology*, **64**, 87-93.
- Yamaguchi et al., 2012. Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. *Annals of Glaciology*, **53**, 6-12.
- 梶川ほか, 1996: 雪片の落下速度と構成結晶形との関係. *雪氷*, **58**, 455-462.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線) *は報告書の中で引用しているもの

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Ishizaka M., H. Motoyosi, S. Yamaguchi, S. Nakai, T. Shina, K. Muramoto, 2016. Relationships between Snowfall Densities and the Main Types of Solid Hydrometeors Deduced from Measured Size and Fall Speed, for snowpack modeling applications. *The Cryosphere Discussion*, 1-20. doi:10.5194/tc-2016-68, 2016.* (査読有)
- ② Avanzil F., H. Hirashima, S. Yamaguchi, T. Katsushima, and C. De Michele, 2015. Laboratory-based observations of capillary barriers and preferential flow in layered snow. *The Cryosphere Discussion*, 6627-6659. doi:10.5194/tcd-9-6627-2015. (査読有)
- ③ Avanzi, F., S. Yamaguchi, Hirashima, H., Michele, D. C., 2015. Bulk volumetric liquid water content in a seasonal

snowpack: modeling its dynamics in different climatic conditions. *Advances in Water Resources*. **86**, 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.021>. (査読有)

- ④ 八久保晶弘, 山口悟, 堀雅裕, 谷川朋範, 杉浦幸之助, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 青木輝夫. 2015. 野外におけるガス吸着式積雪SSA測定装置の運用. *北海道の雪氷*, **34**, 15-18.* (査読無)
- ⑤ Yamaguchi, S., H. Motoyoshi, T. Tanikawa, T. Aoki, M. Niwano, Y. Takeuchi and Y. Endo, 2015. Application of snow specific surface area measurement using an optical method based on near-infrared reflectance around 900-nm wavelength to wet snow zones in Japan, *Bulletin of Glaciological Research*, **32**, 55-64. doi: <http://dx.doi.org/10.5331/bgr.32.55>* (査読有)

[学会発表] (計 10 件)

- ① Yamaguchi, S., M. Ishizaka, H. Motoyoshi, K. Nakamura, A. Hachikubo. Specific surface area of new snow. International Symposium on snow and avalanche in Niseko, 2015年12月9日-12月12日, ニセコ.*
- ② 山口悟, 本吉弘岐, 谷川朋範, 青木輝夫, 体積含水率と積雪の近赤外域の反射率との関係. 雪氷研究学会(2015・松本), 2015年9月14日-9月16日, 松本.*
- ③ 八久保晶弘, 山口悟, 堀雅裕, 谷川朋範, 杉浦幸之助, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 青木輝夫. ガス吸着式積雪比表面積測定装置の改良, 雪氷研究学会(2015・松本), 2015年9月14日-9月16日, 松本.*
- ④ 山口悟, 本吉弘岐, 青木輝夫, 谷川朋範. 光学的積雪比表面積測定装置の開発. 2015年度(公社)日本雪氷学会 北信越支部大会, 2015年6月6日, 松本.*
- ⑤ 山口悟, 石坂雅昭, 本吉弘岐, 八久保晶弘, 青木輝夫. 新雪の比表面積と降雪種との関係 (2). 2015年度(公社)日本雪氷学会 北信越支部大会, 2015年6月6日, 松本.*
- ⑥ 八久保晶弘, 山口悟, 堀雅裕, 谷川朋範, 杉浦幸之助, 的場澄人, 庭野匡思, 朽木勝幸, 青木輝夫. 野外におけるガス吸着式積雪SSA測定装置の運用. (公社)日本雪氷学会 北海道支部研究発表会, 2015年5月15日-5月16日, 札幌.*
- ⑦ 山口悟, 石坂雅昭, 本吉弘岐, 八久保晶弘, 青木輝夫, 降雪種と比表面積との関係, 2014年度日本気象学会秋季大会, 2014年10月21日-10月23日, 福岡.*
- ⑧ 山口悟, 八久保晶弘, 青木輝夫, 積雪の比表面積の減少に及ぼす温度・気圧の効果, 雪氷研究大会(2014・八戸), 2014年9

月20日-9月23日, 八戸

- ⑨ 安達聖, 中村一樹, 山口悟, 阿部修, 積雪比表面積測定手法の比較, 雪氷研究大会(2014・八戸), 2014年9月20日-9月23日, 八戸*
- ⑩ 八久保晶弘・山口悟・堀雅裕 谷川朋範 杉浦幸之助 的場澄人 庭野匡思 朽木勝幸 青木輝夫, 融雪初期における積雪比表面積の深度プロファイルの経時変化, 雪氷研究大会(2014・八戸), 2014年9月20日-9月23日, 八戸

6. 研究組織

(1)研究代表者

山口 悟 (YAMAGUCHI SATORU)
国立研究開発法人 防災科学技術研究所
観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター・主任研究員
研究者番号：70425510

(2)研究分担者

八久保 晶弘 (HACHIKUBO AKIHIRO)
北見工業大学 環境・エネルギー研究推進センター・教授
研究者番号：50312450

(3)連携研究者

谷川 朋範 (TANIKAWA TOMONORI)
気象庁気象研究所・気候研究部・研究官
研究者番号：20509989

(4) 連携研究者

竹内 由香里 (TAKEUCHI YUKARI)
国立研究開発法人 森林総合研究所 気象環境研究領域・チーム長
研究者番号：90354755