

近赤外分光法による積雪の物理情報計測

Measurements of physical information of snowpacks using near-infrared spectroscopy

原田 康浩¹, 佐々木 暢耀¹, 棚橋 昂樹¹

Yasuhiro Harada¹, Nobuaki Sasaki¹, Kouki Tanahashi¹

Corresponding author: harada @mail.kitami-it.ac.jp (Y. Harada)

We demonstrated experimentally that the diffuse reflectance of snowpack is proportional to the ratio of snow density to snow grain size in the near infrared region where multiple absorption peaks by ice appear. However, it remained to determine these two physical quantities of snowpack separately. In this study, we performed data processing and principal component analysis that focused only on the effect of absorption, excluding the effect of scattering by snow grains, and demonstrated the possibility of determining snow grain size independently from the NIR diffuse reflectance spectrum of snow.

1. はじめに

積雪の粒径と密度は、積雪のアルベドを支配する物理量であるとともに、積雪変性過程を表現する重要な物理量であり、積雪断面観測において必須の測定項目である。しかし、積雪粒子は一般に非球形で複雑な形状のため、目視による観測では観測者によるばらつきが避けられない。また、積雪全層にわたる測定では長時間を要することが難点であり、これらの物理量を短時間に比較的容易に測定できる手法の開発が望まれている。

積雪は雪粒子と空気から構成される多孔質媒質であり、光学的には多重散乱媒質である。したがって、これに光を照射して得られる分光反射率は積雪を構成する雪結晶の大きさ、積雪深さ、密度ならびに光の散乱と吸収の波長依存性によって決まるため、積雪の反射率測定のみからこれらの物理量を特定できる可能性がある。我々は、光の吸収ピークが複数現れる近赤外域において、積雪からの拡散反射率が積雪の密度と粒径の比(密度粒径比)と比例関係にあることを実験的に明らかにした¹⁾。このことは積雪の密度粒径比を迅速にかつ容易に測定できる可能性を示すものであるが、これらを二つの物理量を分離して決定することができないため、それが課題として残されている¹⁾。

本研究では、反射率を吸収に注目した量である吸光度に変換し、さらに散乱による影響を除去する前処理を施すことで、積雪の粒径のみに影響する関係が得られるのではないかと発想でデー

タの再解析を行ない、その積雪物理量依存性を調べた。スペクトルデータの依存性因子解析には主成分分析を用い、その形状を決めている因子の数とその影響が強く現れる波長域を考察した。

2. 積雪の近赤外反射率スペクトルデータとその処理方法

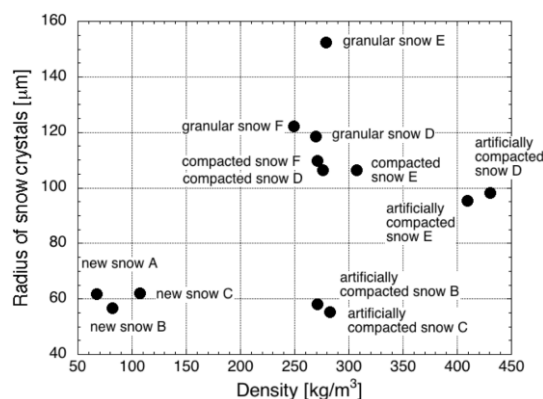
2.1 近赤外反射率スペクトルデータ

解析対象の近赤外反射率スペクトルデータには、2019年2月7, 8日に北海道北見市の北見工大にて採取した新雪(3)、しまり雪(30)、ざらめ雪(3)、圧雪(新雪)(2)、圧雪(しまり雪)(2)の5種類の雪質の合計13の積雪試料を用いて得られた反射率データを用いた。積雪種類の括弧内の数字は同一種類の雪質で異なる場所・日時に採取した試料の数である。

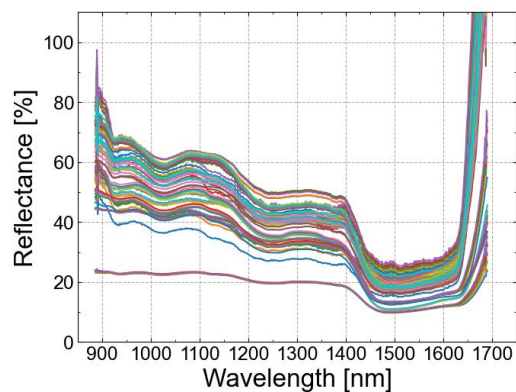
ここで反射率の測定は、これらの積雪を内壁がつや消し黒塗装されたφ80mm x D45mmの円筒ポリエチレン容器に充填して積雪試料とし、ハロゲン光源(Ocean Optics, HL-2000)からの光を光ファイバを介して積雪試料表面に照射し、そこからの拡散反射光を積分球(Ocean Optics, ISP-REF)で集光して光ファイバで導光した後、分光器(Ocean Optics, NIRQuest, 波長900nm-1700nm)で検出して行った。すなわち測定した反射率は拡散反射率である。測定は一つの試料につき、積分球の設置向きを変えて5回行った。したがって反射率スペクトルデータの数は65である。積雪の密度は試料ケースごとに重量を測定して算出した。雪結晶の粒径は、IceCube (A2 Photonics Sensors)²⁾により

¹北見工業大学 地域未来デザイン工学科

School of Regional Innovation and Social Design Engineering,
Kitami Institute of Technology



(a) 13 積雪試料の密度と粒径間の散布図



(b) 近赤外拡散反射率スペクトル (65 データ)

図 1 積雪試料の密度-粒径散布図 (a) と測定した近赤外拡散反射スペクトル (b).

積雪の比表面積 (Specific Surface Area: SSA) を測定し、球等価粒径を算出して粒径の代表値とした。図 1(a) は 13 種類の積雪試料の密度と粒径の関係を散布図で表したものであり、図 1(b) がこれらの積雪からの拡散反射率スペクトルである。これらのグラフからは積雪の二つの物理量が反射率スペクトルの分布形状にどのような影響を及ぼしているのかは直感的には分からない。

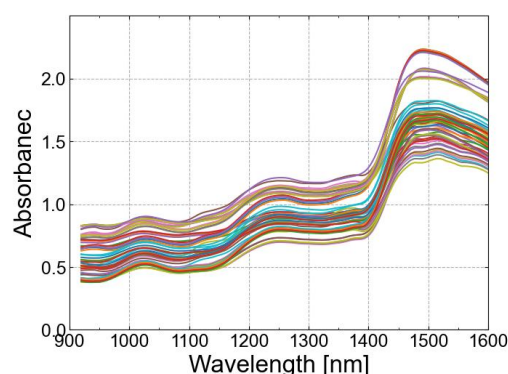
2.2 データ処理

(1) 前処理

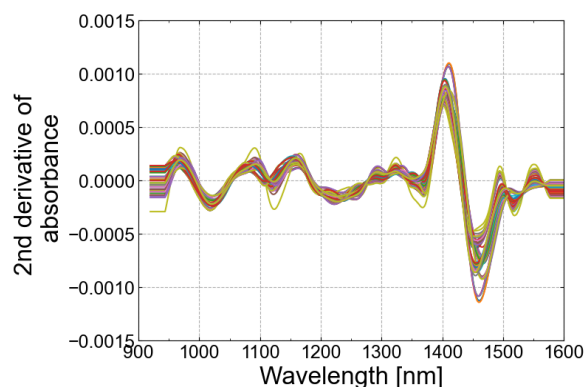
前述の近赤外反射率データに対して、前処理として 1) 吸光度スペクトルへの変換、2) 波長域の制限、3) アウトライヤー (例外) 除去、4) 平滑化二次微分を施した。吸光度とは反射率の逆数の常用対数をとったものであり、試料による光の吸収の度合いを表す指標である³⁾。また平滑化微分操作は、粒状性の試料の吸光度スペクトルを拡散反射法で測定した際にスペクトルに付加されるベースラインの上下変動と波長に比例したトレンドを除き、かつスペクトルに重畳した細かな雑音を除去する効果をもつ処理である³⁾。すなわち、粒状性の試料が試料ケースに充填される際の密度の違いによる影響を除く効果を持つ。

(2) 主成分分析

図 1(b) の反射率スペクトルや図 2(b) の二次吸光度スペクトルは多数の波長の反射率 (吸光度) から構成されており、個々の波長における反射率 (吸光度) は、試料ごとにそれぞれ異なる値をとる変数である。したがって、スペクトルは多くの変数から構成される多変量データとみなすことができる。このような多変量データに対して次元減少を行って試料間の特性の違いが及ぼす影響を調べる分析方法が主成分分析 (principal



(a) 波長域制限およびアウトライヤー除去後の吸光度スペクトル



(b) 平滑化二次スペクトル

図 2 波長域制限後の吸光度スペクトル (a) とその平滑化二次微分スペクトル (b).

component analysis: PCA) である³⁾。ここでは、図 2(b) の 2 次微分吸光度スペクトルに対して主成分分析を行って、スペクトルの形状を決めている主要な因子数 (主成分数) を割り出した。主成分分析を行うことで、波長を変数とする多変量データ (スペクトル) は、主成分を変数とする関数値を表すスコアと、スペクトルデータのどの変数 (波長) でその主成分への影響が強く現れている

かを表すローディングの二つの行列に分解される⁴⁾。解析結果は、主成分の寄与率からスペクトルの形状を決めている因子数を、ローディングからその主成分が影響を及ぼしている波長（域）を、スコアの値から試料の物理量との関係を調べる。同様な方法を拡散反射率スペクトルにも適用して、反射率スペクトルの形状を決めている因子数と積雪物理量の関係も調べ、先に得ている結果（反射率が積雪の密度粒径比に比例する）¹⁾の検証も行なった。

3. 結果と考察

3.1 反射率スペクトルの解析結果

表1は反射率スペクトルに1) 波長域の制限, 2) アウトライヤー処理, 3) 平滑化を施して、主成分分析して得られた最初の3つの主成分の寄与率と累積寄与率である。これより、積雪試料毎の反射率スペクトル形状の違いは、第1主成分という一つの因子でほぼ決まっていることがわかる。すなわち、積雪の密度と粒径の異なる複数の積雪試料ではあるが、その拡散反射スペクトルから積雪密度と粒径の二つの物理量を独立に決定することができないことを示唆するものである。

図3は3つの主成分のローディングを示すグラフである。第1主成分のローディングは、波長950nmから1150nmと1200nmから1400nmの二つの波長域で-0.045から-0.060の高い値とり、この波長域の反射率が試料毎の違いを決めている重要な情報であることを示している。すなわち、氷による吸収波長1492nm⁵⁾よりも短い波長域での拡散反射率に試料毎の違いの影響が現れている。図4は、第1主成分のスコア値を積雪の密度粒径比を横軸にとってプロットしたものである。第1主成分のスコア値と密度粒径比の間には高い決定係数で負の相関関係にあることがわかる。すなわち、先に我々が報告した結果（積雪からの拡散反射率が積雪の密度粒径比と比例関係にあること）をこの分析方法からも確認できたことを表わすものである。

3.2 二次微分吸光度スペクトルの解析結果

表2は図2(b)の二次微分吸光度スペクトルを主成分解析して得られた最初の3つの主成分の寄与率と累積寄与率である。ほぼひとつの主成分のみで決まっていた反射率スペクトルの場合とは異なり、二次微分吸光度スペクトルの場合はその形を決めている因子は3程度であることがわかる。

表1 反射率スペクトルの3つの主成分の寄与率

主成分番号	寄与率	累積寄与率
1	90.98%	90.98%
2	6.40%	97.38%
3	2.44%	99.82%

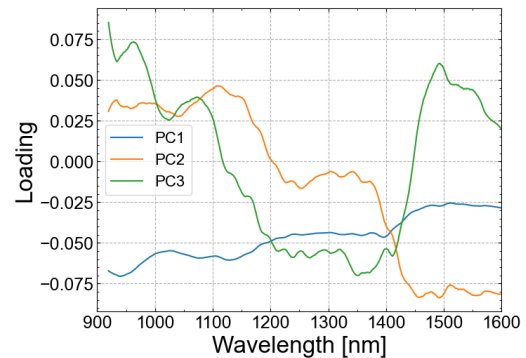


図3 前処理後の反射率スペクトルの3つの主成分のローディング。

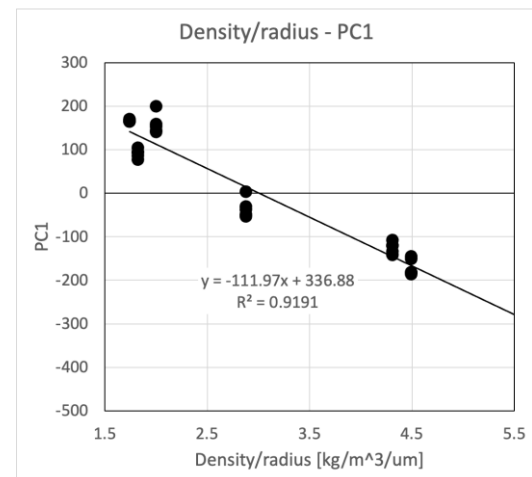


図4 第1主成分のスコア値と積雪試料粒径比の関係。

表1 二次微分吸光度スペクトルの3主成分の寄与率

主成分番号	寄与率	累積寄与率
1	58.68%	58.68%
2	23.15%	81.83%
3	14.64%	96.47%

図5はこの場合の3つの主成分のローディングを示す。反射率スペクトルの場合とは異なり、この場合は1400nmから1500nmという氷の吸収波長1492nmを含む波長域でそれぞれの成分が高いスコア値を示している。図6は3つの主成分のスコア値と積雪試料の密度と粒径の関係を網羅的に調べた散布図である。これらの散布図の

中で高い決定係数で線形関係が見られるのが図6(e)の第2主成分のスコア値と積雪粒径の関係である。この関係は、吸光度の二次スペクトルから積雪の粒径のみを独立に決定できる可能性を示唆するものである。

4. まとめ

密度と粒径の異なる5種類の積雪の13個の試料から得られた近赤外拡散反射率スペクトルおよび二次微分吸光度スペクトルに主成分分析を施して、それぞれのスペクトル形状を決めている要因の数および積雪物理情報の関係を調べた。その結果次の二つのことが明らかとなった。

- (1) 反射率スペクトルの形状を決めている因子はほぼ1つであり、積雪密度粒径比である。
- (2) 二次微分吸光度スペクトルの形状を決めている因子はほぼ3つあり、そのひとつの因子(第2主成分)は積雪粒径である。

これら二つの結果を組み合わせれば、近赤外拡散反射率の測定から積雪の密度と粒径を独立に決定できることを意味する。

【参考文献】

- 1) 原田 康浩, 城 佑輔, 二瓶 啓利, 星野 聖太, 舘山 一孝, 神田 淳, 2020: 近赤外分光法による積雪の物理情報計測, 第36回近赤外フォーラム講演要旨集, O-12.

- 2) J.-C. Gallet, F. Domine, C.S. Zender, and G. Picard, 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.
- 3) 岩元睦夫, 魚住純, 1994: 近赤外分光法入門, 東京, 幸書房, 168 pp.
- 4) 尾崎 幸洋, 2015: 近赤外分光法, 東京, 講談社, 278 pp.
- 5) J. Workman Jr. and L. Weyer 2012: *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*, 2nd ed., Boca Raton, CRC Press, 55-61.

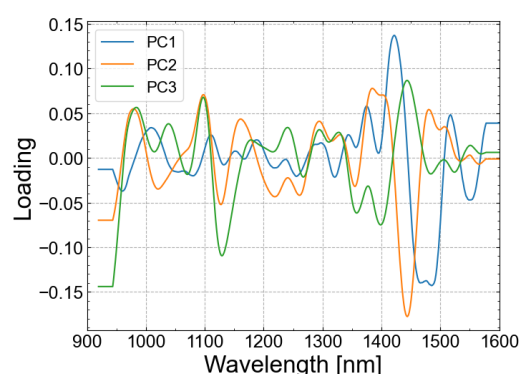


図5 二次微分吸光度スペクトルの3つの主成分のローディング。

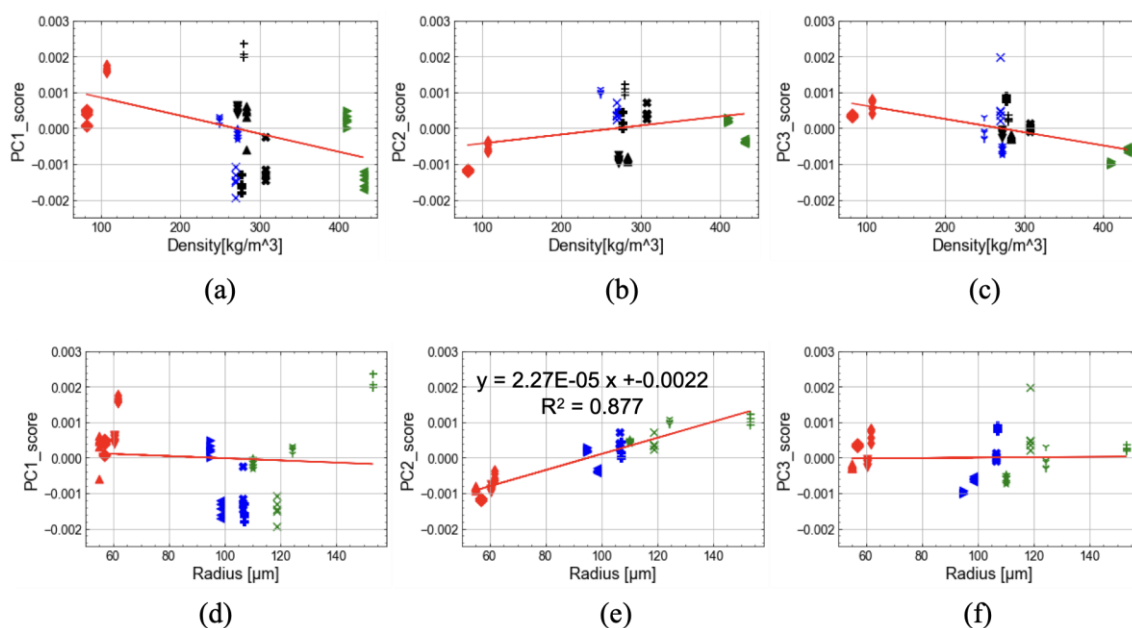


図6 第1主成分から第3主成分のスコア値と積雪試料の密度および粒径の。(a)-(c): 積雪密度依存性, (d)-(f): 積雪粒径依存性。(a), (d): 縦軸第1主成分のスコア値, (b), (e): 縦軸第2主成分のスコア値, (c), (f): 縦軸第3主成分のスコア値。