

積雪の近赤外拡散反射スペクトルに及ぼす積雪試料容器と密度の影響

Experimental study on effects of sample size and snow density on near-infrared spectral reflectance of snow pack

原田 康浩 (北見工業大学), 山田 知生 (北見工業大学), 田中 康弘 (北見工業大学),
鳥越 悠加 (北見工業大学), 館山 一孝 (北見工業大学), 神田 淳 (宇宙航空研究開発機構)
Y. Harada, T. Yamada, Y. Tanaka, Y. Torigoe, K. Tateyama, and A. Kanda

1. はじめに

積雪の比表面積 (specific surface area: SSA) は、雪粒子の粒径のみならず、雪粒子の形状と結合状態を反映した量であり、積雪の種類と内部構造を表現するのに適したものである。近年は野外で簡単に比表面積を測定する方法として、近赤外域の光を積雪に照射して反射率を測定し、そこから比表面積を算出する方法が提案され¹⁾、IceCube という名称で市販化もされている²⁾。しかし積雪は雪粒子と空気 (濡れ雪の場合は水) から構成される多孔質媒質であって光学的には多重散乱体であるため、そこからの光の反射率は雪粒子の粒径、光学特性の波長依存性、結合状態のみならず、積雪の物理的なサイズ (例えば積雪深と空間広がり) に依存して値が変わるものであり、また試料表面も粗面であるため、測定する場所によって反射率が変動する可能性もある。一般に積雪の反射率は半無限の大きさと深さの積雪を想定して定義されるが、実用上そのような試料を準備しての反射率の測定は不可能であり、積雪試料の大きさを考慮した反射率を検討する必要がある。

本研究では、光学的に比表面積を決定する方法において基本となる積雪からの近赤外域の反射率の値およびそのスペクトル分布形状に注目し、それに及ぼす積雪試料の大きさ、すなわち積雪試料容器の大きさの影響を実験的に調べた。また同一の積雪粒子でも密度、すなわち雪粒子の結合状態が異なる場合の影響がどのような形で現れるのかも調べた。

2. 実験概要

2.1. 測定系

図 1 (a) に本実験で使用した近赤外域の反射率分布の測定実験系の概略を、図 1 (b) に積雪からの拡散反射光の測定プローブ部分となる積分球と積雪試料の関係の模式図を示す。光源にはハロゲン光源 (Ocean Optics, HL-2000, 波長 360nm–2400nm) を使い、そこからの光を光ファイバで積分球 (Ocean Optics, ISP-REF) に導き、下面の孔より積雪試料に照射する。積雪試料から拡散反射光は積分球内で多重反射された後、もう 1 本の光ファイバに集められ分光器 (Ocean Optics NIRQuest, 波長 900nm–1700nm, 512ch) に導かれて、近赤外域の反射光強度が検出される。ここで、積雪試料からの反射光強度を測定する前に、分光器の暗電流を測定して除去し、同一の条件で白色板からの反射光強度を測定しておくことで、積雪からの拡散反射率が測定できる。なお、積雪からの散乱光のうち、積分球の孔以外に到達した光

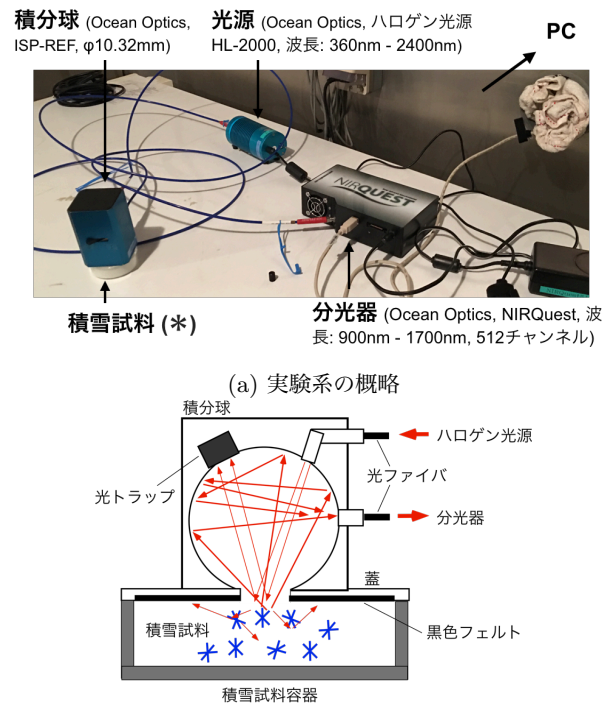


図 1 積雪反射率スペクトルの測定実験系。

が再度積雪試料に反射されることを防ぐために、積雪積分球と積雪試料表面の間には散乱光を吸収する黒色のフェルトを挟んでいる。

2.2. 積雪試料容器と実験条件

積雪試料容器には次の 2 種類の大きさを準備した。いずれも内壁には容器壁での光の反射を抑制するためにつや消し黒色塗装を施している。また容器 A では底面に反射防止用に黒色のフェルト布を敷いて使用した。

容器 A： H300 × W300 × D100mm の長方体金属製容器

容器 B： $\phi 80\text{mm} \times D45\text{mm}$ の円筒ポリエチレン容器

実験は表 1 に示した自然降雪の積雪（新雪）を屋外にて採取し、二つの容器に充填して低温室（北見工業大学社会連携推進センター定温室，設定気温 -13°C ）にて、積雪密度を測定して採取後 4 時間以内に図 1 に示した装置を用いて近赤外域の反射率を測定した。なお、2018 年 2 月 6 日に採取・実験した積雪は、採取後に自作の圧雪器具を用いて圧雪して密度を調整し、自然積雪での密度 $80.4[\text{kg}/\text{m}^3]$ を含め、合計 6 種類の密度の積雪を作り使用した。測定は、2018/01/10 から 2018/01/17 に採取した積雪では、試料容器 A, B 両方を対象として試料表面の中央部で積分球の設置向きを変えてそれぞれ 5 回行った。2018/02/06 に採取した積雪試料では、試料容器は容器 B のみに限定して、異なる密度の試料毎に試料表面の中央部で積分球の設置向きを変えて 5 回測定した。

表 1 使用した自然雪の採取期日と諸元ならびに実験内容。

積雪採取期日 (測定期日)	積雪種類	積雪密度 ρ [kg/m^3]	試料容器の種類	実験内容
2018/01/10	新雪	52.6	容器 A, 容器 B	容器毎で、積分球の設置向きを変え、5 回測定
2018/01/11	新雪	139.1	容器 A, 容器 B	容器毎で、積分球の設置向きを変え、5 回測定
2018/01/17	新雪	91.8	容器 A, 容器 B	容器毎で、積分球の設置向きを変え、5 回測定
2018/02/06	新雪	80.4, 107.6, 111.3 142.6, 156.6, 183.5	容器 B	密度毎に積分球の設置向きを変え、5 回測定

* 積雪の採取場所はいずれも北見工業大学社会連携推進センター（北海道北見市文京町）の屋外。

3. 実験結果と考察

図 2 (a), (b) はそれぞれ、大きい長方体金属製容器の容器 A と 小さな円筒ポリスチレン容器の容器 B に充填した積雪試料から得られた近赤外域の反射率のスペクトルの測定結果である。それぞれの積雪試料に対して積分球の設置向きを変えて 5 回測定した結果の平均値を記号で、標準偏差を縦棒で示している。いずれの測定結果も、よく知られた波長依存性を示している。すなわち、波長 800 nm から 1400 nm にかけて次第に低下し、波長 1500 nm 付近で反射率が最低値となり、さらに波長が増加すると反射率は若干増加する^{3), 4)}。3 つの積雪試料での反射率の値の大小関係は、使用した積雪が異なる採取期日の積雪であるため、ここに示した積雪の密度の違いだけでは直接議論はできないので、ここでは議論せず、以下で測定毎でのばらつきと試料容器による違いについて考察する。

3.1. 測定毎のばらつきと試料容器の影響

図 2 (a) の容器 A の場合は、積雪密度が $\rho = 52.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ と小さい場合は測定毎のばらつきが大きい、 $\rho = 91.8, 139.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ と大きくなるにしたがって測定結果のばらつきが小さくなっていることが分かる。これは、密度が高い積雪では照射された光が密接する積雪粒子による多重散乱によって拡散反射となるため、表面からの散乱光の強度に方向異方性や測定場所の局所性が小さいのに対し、密度の低い積雪では雪粒子が空間

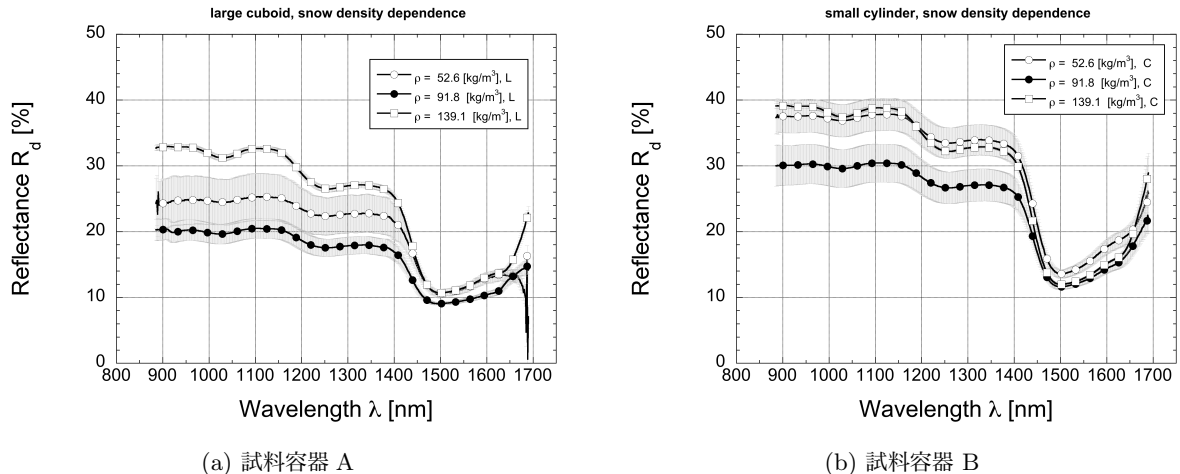


図 2 3つの異なる積雪試料からの近赤外反射率スペクトル：(a) 容器 A に充填した場合、(b) 容器 B に充填した場合。

的に疎に存在するため、個々の雪粒子による単散乱や低次元散乱の影響が強く、積分球の設置向きや位置で測定結果が大きく変わることが原因であると考えられる。

図 2 (b) に示した小さいサイズの容器 B の場合は、積雪密度 $\rho = 52.6 \text{ kg/m}^3$ の場合に加えて密度 91.8 kg/m^3 の場合も測定の際にばらつきが大きく現れている。密度 139.1 kg/m^3 の場合は容器 A と同様にばらつきは非常に小さい。各積雪試料での反射率の値の大小関係は容器 A の場合と同じである。しかしながら、その値はすべての波長にわたって容器 A の結果よりも高い値となっている。

これらの試料容器の違いによる測定結果の違いは、いずれも容器壁面における反射と散乱が容器サイズの小さい容器 B で顕著に現れた結果であると考えられる。すなわち、図 3 (a) に示すように、容器が小さい場合は積雪表面から照射され積雪内部で散乱されて広がった光は、まだ雪による散乱と吸収で十分に弱く減衰する前に容器壁面に遭遇する。壁面の光の吸収（具体的には黒色塗装による光吸収）が完全でなければ、散乱光は容器壁面で反射して積雪中の散乱して伝播し、その一部は積分球で検出される。その結果、十分に大きな積雪試料であれば存在しない容器壁面からの反射光を余分に検出することで反射率の高い値となる。

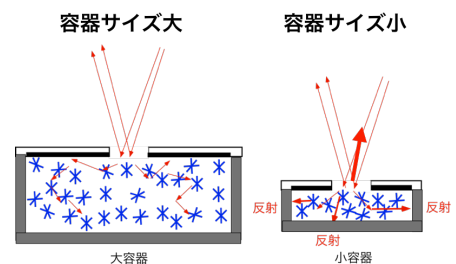


図 3 試料容器壁面での反射・散乱の影響の容器サイズによる違い。

3.2. 積雪密度の影響

図 4 (a) は 2018 年 2 月 6 日に採取した積雪（新雪）に対して自作の装置で密度を 6 段階に変化させた試料を用いて測定した近赤外反射率を示す。積雪からの近赤外反射スペクトルの形状の特徴は維持したまま、積雪の密度が増加するとともに、反射率の値はいずれの波長においても増加している。ただし、波長 900 nm から 1400 nm にかけて反射率の増加に比較して、波長 1500 nm から 1650 nm の波長域での増加量は小さく、密度の影響は強くない。これらの特徴は、密度の高い雪ほど照射した光は内部に深達せず、積雪表面近くの雪粒子によって散乱されることが、氷の光吸収が 1500nm から 1650nm で高い（複素屈折率の虚数部が大きい）ということによって説明できる。これらの関係をより定量的に理解するために、波長範囲を

Range 1: 920 – 1000 nm, **Range 2:** 1040–1150 nm, **Range 3:** 1250–1400 nm, **Range 4:** 1490–1600 nm

の 4 つに分け、それぞれの波長範囲の反射率の平均値を算出し、その値が密度の増加に対してどのように変化を調べた。その結果を図 4 (b) に示す。ここで、縦軸の値は積雪の密度が 80.4 kg/m^3 の場合の平均反射率を

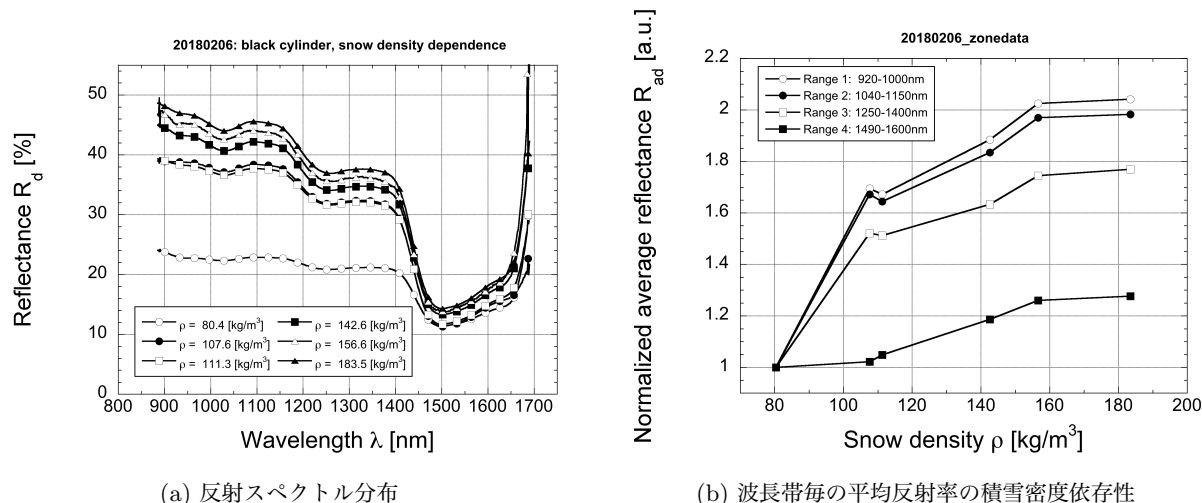


図 4 密度を変えた同一の積雪試料からの近赤外反射率スペクトルとその積雪密度依存性: (a) 反射スペクトル分布, (b) 波長帯毎の平均反射率の積雪密度依存性.

1 として, 規格化してプロットしている. このグラフから, Range 1, 2, 3 の近赤外域の反射率が, Range 4 に比較して積雪密度の増加に対して大きく増加するのが見て取れる. 例えば, 密度が 80 kg/m^3 から 160 kg/m^3 と 2 倍になった場合, 平均反射率は Range 1, 2 で約 2 倍, Range 3 で約 1.7 倍となるのに対し, Range 4 では変化は小さく約 1.3 倍であることが分かる.

4. まとめ

積雪からの近赤外域の反射率の値およびそのスペクトル分布形状に及ぼす測定位置やプローブ (積分球) の向き, 積雪試料容器の大きさと積雪密度の影響を実験的に調べた. その結果, 以下のことが分かった.

- 測定毎の結果のばらつきは, 密度が低い雪で大きく, 密度の高い雪では少ない.
- 測定毎の結果のばらつきは, 試料容器が小さい場合に密度の高い雪でも大きく現れる場合がある.
- 反射率の値は試料容器が大きいほど低い値となり, 容器が小さい場合は高い値で測定される.
- 積雪の粒子径が同じで密度が異なる場合は, 密度が高いほど反射率は高くなり, また, その変化は 800nm から 1400nm の光波長範囲で顕著に現れる.
- 密度変化による反射率の変化は水の光吸収帯である波長 1500nm - 1600nm の範囲でも無視できない値で現れる.

以上の結果は, IceCube のように有限サイズの試料容器 (内径 63 mm , 深さ 25mm の円筒容器^{1, 2)}) に積雪を充填し, 近赤外光 (波長 1310 nm のレーザー光^{1, 2)}), 本研究における Range 3) を用いて積雪からの反射光強度を測定し, その値を用いて経験式にしたがって比表面積を求める計測機器において, その試料容器サイズ, 内壁での反射・散乱, 積雪充填時の密度変化が結果に大きく影響を及ぼすことを示唆しており, それら装置の使用時はこの点の注意が必要であることを指摘するものである.

参考文献

- [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 1310nm and 1550nm , *The Cryospheres*, **3**, 162–182.
- [2] A2 Photonics Sensor, France: http://www.a2photonicsensors.com/en/products_IS3.html
- [3] Wiscombe, W.J., and Warren, S.G., 1981: A Model for the Spectral Albedo of Snow. I: Pure Snow, *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2712–2733.
- [4] 青木 輝夫, 2007: 積雪の衛星リモートセンシング, 雪氷, **69**, 155–167.