

埋設型雪氷モニタリングセンサ GLASS-3 を用いた積雪含水率の推定

Estimating Snow-water Content Using a Ground Laser Sensor for Snow monitoring

佐藤功坪¹, 舘山一孝², 神田淳³, 原田康浩⁴, 星野聖太³
Kohei Sato¹, Kazutaka Tateyama², Atushi Kanda³, Yasuhiro Harada⁴, Seita Hoshino³
Corresponding author: m2052200070@std.kitami-it.ac.jp (K.Sato)

Winter weather conditions affect the safety and efficiency of aircraft operations. Specifically, wet snow makes runways slippery and thus affects the takeoff and landing of aircraft. To navigate an aircraft safely, The Japan Aerospace Exploration Agency is developing the Ground Laser Sensor for Snow Monitoring (GLASS) for detecting the condition of runways by light scattering. In this study, we measured the snow-water content of wet snow and slush on a runway and estimated the snow-water content using GLASS-3. The measurements showed that we estimated the snow-water content within an error of 4%.

1. 研究背景と目的

日本における航空輸送量の規模は世界でも有数であり、航空機は重要な公共交通機関となっている。しかし、航空機にとって特殊気候(雪氷, 雷, 火山灰等)は航空機の安全な運航や効率性において大きな問題となっている¹⁾。また、世界から見ても日本は特に冬季における航空機の運航は厳しい環境である。滑走路に雪や氷があることでダイバート(目的地変更)や欠航による運航効率の低下、離発着が可能な場合でも、オーバーランなどのインシデントが発生する可能性がある。新千歳空港では2017年1月19日にオーバーラン事故が発生している。同様に2019年1月5日には降雪によって105便が欠航、約2000人が空港に足止めされるなど日本では年間数百~数千便の欠航、およびダイバートが年間数十便発生している²⁾。雪氷による滑走路の問題に対応するためには、滑走路の積雪深や雪質といった雪氷情報を正確に把握することが重要である。しかし、現状では滑走路の状態をリアルタイムにモニタリングする仕組みは存在しない。そこで、滑走路面に埋設型の光学センサを設置することで雪氷情報をリアルタイムにモニタリングできる滑走路埋設型の雪氷モニタリングセンサ Ground laser sensor for snow monitoring (以下GLASS)を宇宙航空研究開発機構と株式会社センテシアが共同開発をしている。積雪状況を推定する手法

として積雪底面に向けて光を入射させることで、散乱光の様子から雪氷情報を推定する技術が三宅ら²⁾によって開発されており、この手法がGLASSに採用されている。また、星野ら³⁾によると積雪の後方散乱特性を利用することで10mm前後の精度で積雪深を推定できることがわかっている。しかし、雪の含水率によって散乱特性がどのように変化するかはわかっていない。本論文では、GLASSの三代目にあたるGLASS-3を用いて、含水率による後方散乱光特性を調べ、それを利用した積雪含水率の推定手法について報告する。

2. 含水率の異なる雪を用いた散乱光実験

2.1 使用実験機材, GLASS-3 について

実験で使用した装置、GLASS-3についての概要図を図1に示す。滑走路に埋設されたセンサから積雪底面に向けてレーザー光照射をおこない、光が散乱している様子をカメラで撮影する装置である。散乱光を撮影するカメラは株式会社アートのARTCAM-I30HP-WON, ARTCAM-0016TNIRを採用している。また、GLASS-3には波長の異なる4つのレーザー光(可視光のV1, V2と近赤外のN1, N2)を搭載している。

¹ 北見工業大学大学院 社会環境工学専攻

² 北見工業大学 地球環境工学科

³ 宇宙航空研究開発機構

⁴ 北見工業大学 地域未来デザイン工学科

Graduate School of Civil Engineering, Kitami Institute of Technology
School of Earth, Energy and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
Japan Aerospace Exploration Agency

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

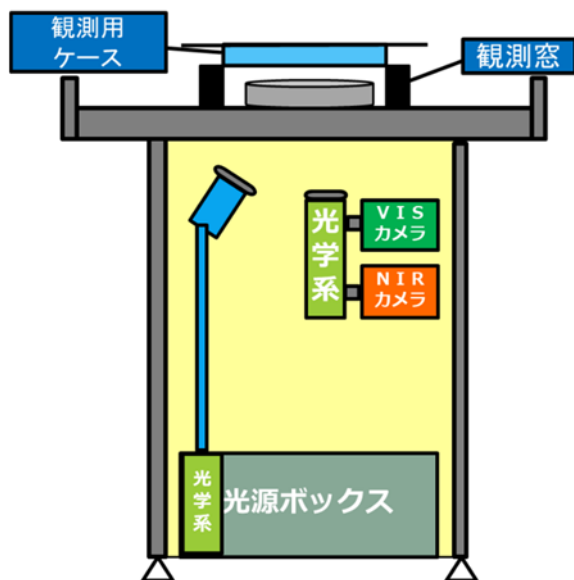


図1 GLASS-3の概要図

2. 2 実験の条件について

実験は北見工業大学社会連携推進センターの低温室にて、屋外で採取した天然の雪に0℃の水を加えることで人為的に雪の含水率を変化させ、ICAO ANNEX 15, APPENDIX 2. SNOWTAM FORMAT⁴⁾を参考に乾雪、湿雪、スラッシュの3種類を用意した。雪結晶の写真を図2に示す。また、雪の含水率は秋田谷式含水率計を用いて測定をおこなった。雪厚は、高さ5mmから50mmまで5mm間隔の観測用試料ケースを使用しており、試料ケースの寸法は約14cm×14cm、底に厚さ約5mmのガラス板をはめることができる。この観測用試料ケースに雪を入れて散乱光の撮影をおこなった。撮影時のカメラの露光時間は波長に合わせた4種類の条件で設定をしている。表1に実験の条件についてまとめる。



図2 作製した雪試料の結晶写真
(左から乾雪, 湿雪, スラッシュ)

3. 実験結果

図3はレーザー波長がV2、露光時間が5/100、雪厚が50mmの条件で撮影した雪試料底面の光散乱画像をフォルスカラーで示したものである。含水率が低い乾雪では画像が明るい、含水率の高いスラッシュになるにつれて画像が暗くなる傾向にある。よって、雪の含水率が高くなれば散乱光強度は小さくなるのが実験からわかった。これを特徴量として定量化するために、画像にある全ピクセルの散乱光強度の和を総散乱光強度と定義する。また、実験に用いた雪試料の含水率測定結果は乾雪が0%、湿雪が約13%、スラッシュは約31%となった。ただし、日本雪氷学会によると気温が0℃未満の環境にある雪は乾雪と定義している⁵⁾ことから、乾雪を含水率0%の雪としている。

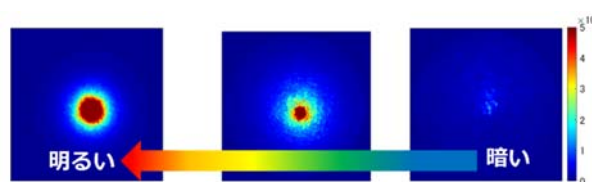


図3 乾雪(左) 湿雪(中央) スラッシュ(右)の光散乱分布のフォルスカラー

表1 実験条件のまとめ

雪質	ざらめ
雪の濡れ具合	乾雪：手で握ったときにバラバラになる。 湿雪：手で握ったときに雪玉ができる。 スラッシュ：手で握ったときに水が滴る。
雪厚(mm)	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
露光時間(s)	可視光(V1,V2) 5/10000, 1/100, 5/100, 1/10 近赤外 (N1,N2) 2/100000, 5/10000, 2/1000, 8/1000

4. 積雪含水率の推定

4. 1 総散乱光強度と含水率との関係

図4は撮影条件が雪厚10mmと50mmにおけるレーザーV2, 露光時間が5/100としたときの総散乱光強度と含水率との関係を示す。含水率と総散乱光強度には強い負の相関関係が見られた。また, 含水率が0から15%の雪では総散乱光強度が雪厚10mmよりも50mmの方が大きいことから, 雪厚によって総散乱光強度が変化することが考えられる。

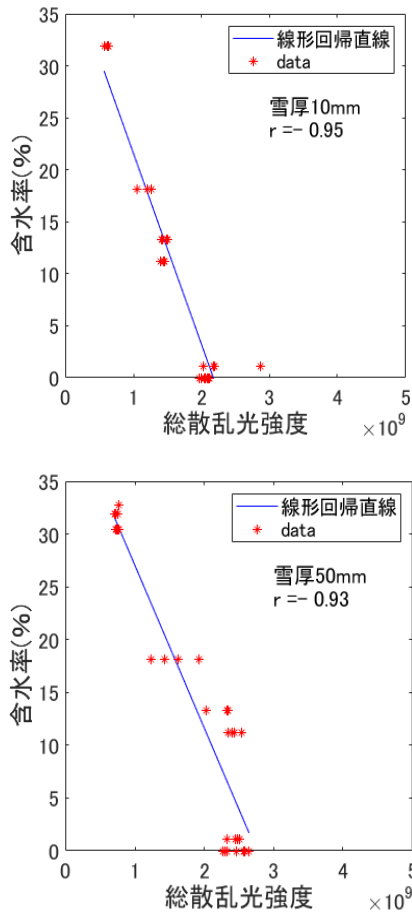


図4 雪厚10mm(上)と雪厚50mm(下)の総散乱光強度と含水率との関係

4. 2 積雪含水率推定式の導出

前節ではレーザーV2, 露光時間5/100における5mmから50mmまでの雪厚ごとに求めた総散乱光強度と含水率の関係から最小二乗法により線形回帰直線式の導出をおこなった。しかし, 含水率を推定するには, 総散乱光強度が雪厚により変化することを考慮し, 雪厚ごとに含水率を推定することが必要であると考えられる。そこで, 図5に示すように得られた回帰直線の傾き, 切片と雪厚に対する指数近似曲線の関係から積雪含水率を求める推定式の係数 a, b の導出をそれぞれおこない, ある積雪深に

対して含水率を求める含水率推定式の導出をおこなった。以下に含水率の推定式を示す。ただし, X はレーザーV2, 露光時間5/100で撮影した画像の総散乱光強度, Y は推定含水率(%), Z は積雪深(mm)とする。

$$Y = aX + b \quad (1)$$

$$a = (-1.03 \times 10^{-8}) * \exp(-0.252Z) + (-1.81 \times 10^{-8}) * \exp(-0.004Z) \quad (2)$$

$$b = (43.3) * \exp(7.98 \times 10^{-4}Z) + (-13.5) * \exp(-0.161Z) \quad (3)$$

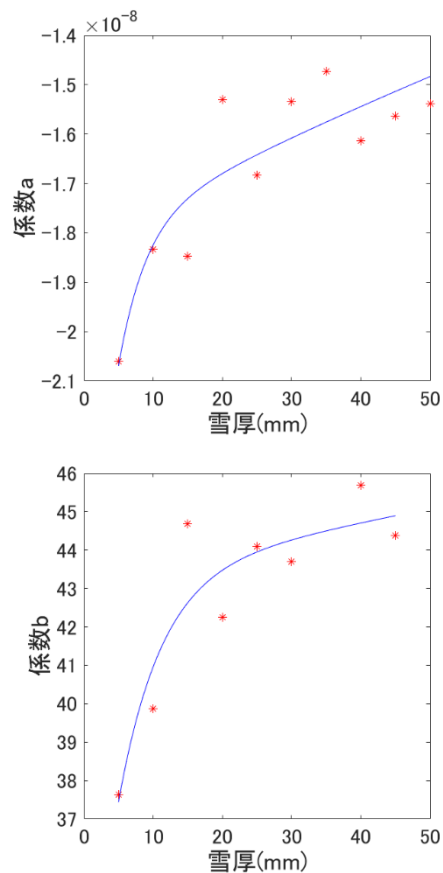


図5 係数 a (上図), 係数 b (下図)と雪厚との関係

4. 3 推定結果

秋田谷式含水率計で測定した実測含水率と導出した積雪含水率推定式から求めた推定含水率を比較した結果, 平均平方2乗誤差が4.0%となった。図6より, スラッシュは推定式によって十分推定できていると考えられる。しかし, 雪厚が大きい50mmの乾雪では推定が5%から10%の間に推定されることが多く見られた。そこで, 雪厚ごとに実測値と推定値との平均平方2乗誤差の値を求め, 雪厚に

よって誤差がどのように変化するか調べた結果 (図7), 雪厚が増加するほど推定含水率と秋田谷式含水率計を用いて測定した実測含水率との誤差が大きくなる傾向に見られた。

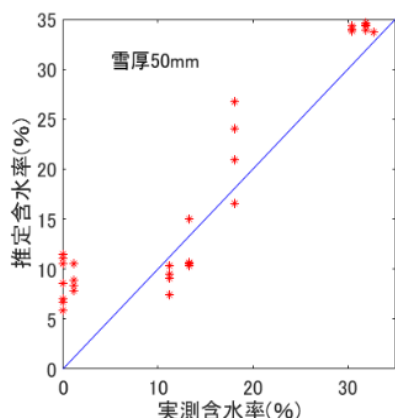


図6 雪厚 50 mm における含水率推定結果

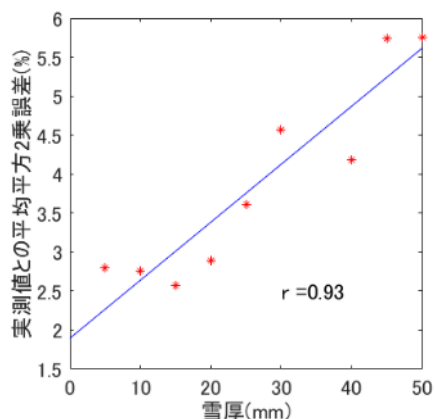


図7 雪厚ごとの平均平方2乗誤差

5. 考察とまとめ

5.1 考察

総散乱光強度と含水率の間に相関がみられたことは、雪結晶が水膜で覆われることで見かけの粒径の増大によって反射率が低下したことが原因であると考えられる。反射率は積雪粒径に依存することが報告されており⁷⁾、本研究の結果と一致している。導出した含水率推定式は、積雪深が増えるほど推定含水率と実測含水率との誤差が大きくなる傾向が見られた。図4下図より、雪厚 50 mm の乾雪と含水率が 10%付近の湿雪における総散乱光強度の値が等しいことから、乾雪では積雪深の増加ともなっていて総散乱光強度の値が飽和してしまうことが誤差の原因と考えられる。また、秋田谷らによると秋田谷式含水率計の計測誤差が 1.0%あると考えられている⁹⁾ことから実測含水率の測定誤差による可能

性も推測される。

5.2 まとめと今後の課題

本研究では、人為的に水を加えることによって含水率の異なる乾雪、湿雪、スラッシュの作製を行い、GLASS-3で撮影をおこなった。実験より、含水率が高くなるほど散乱光強度が小さくなることがわかった。また、レーザー波長 V2、露光時間が 5/100 の条件で撮影された画像から含水率と画像の全ピクセルの明るさである総散乱光強度との関係から雪厚ごとに積雪含水率の推定式を導出した。上記の手法では、雪厚が増加するにしたがって乾雪の推定誤差が大きくなる傾向にあるが、4%前後の精度で積雪含水率を推定できることがわかった。

今後の課題として、本研究では人工的に水を加えることで含水率を変化させているが、自然状態では雪結晶の融解と凍結によって含水率が変化するため、濡れ雪の降る 11 月や 3 月に同様の実験をおこない、導出した推定式が対応可能かどうかを検討する必要があると考えられる。また、本研究で導出した含水率推定式は積雪深が既知であることを条件としているため、GLASS-3 を空港で実用化するためには含水率の高い湿雪やスラッシュにも対応のできる積雪深を求めるアルゴリズムが必要であることも考えられる。

【参考文献】

- 1) WEATHER-Eye コンソーシアム 2017 : WEATHER-Eye ビジョン. 宇宙航空研究開発機構特別試料, AXA-SP-16-012, 40-44
- 2) 三宅俊子ら, 2016 : 積雪の光散乱に関する実験的研究(2)-ダイナミックレンジ拡大による指標改善, 雪氷研究大会(2016-名古屋), 講演要旨集, 1-46
- 3) 星野聖太ら, 2016 : 滑走路埋設型センサを用いた積雪深推定アルゴリズムの開発, 寒地技術論文・報告集 寒地技術シンポジウム, 32 48-53
- 4) ICAO Annex15(2010):Aeronautical Information Services, APPENDIX 2.,SNOWTAM FORMAT APP2-1-APP2-5
- 5) 日本雪氷学会,1990 : 「雪氷辞典」,14
- 6) 秋田谷英次,1978 : 熱量計による積雪含水率計の試作,低温科学物理篇, 36, 109-110
- 7) 青木輝夫, 2007 : 積雪の衛星リモートセンシング, 雪氷, 69, 155-167