

滑走路埋設型センサを用いた極端に薄い雪氷の推定

Estimating extremely thin snow and ice using the Ground LAsEr Sensor for Snow monitoring

依田 明洋¹, 舘山 一孝², 田中 康弘³, 守田 克彰³
Akihiro Yoda¹, Kazutaka Tateyama², Yasuhiro Tanaka³, Katsuaki Morita³
Corresponding author: m3245200361@std.kitami-it.ac.jp (A. Yoda)

Considering runway excursion accidents on snow-covered runways, methods to evaluate conditions are being studied. We developed a sensor that estimates snow and ice based on backscattering characteristics at the snow's bottom. For runway operations, high accuracy is needed for snow and ice less than 3mm thick. We calculated the grayscale images by the sensor and demonstrated the relationship between the half-width and snow thickness. These results indicated the potential to estimate 5mm and less than 3mm for dry snow, and 1mm, 2mm, 3mm, and 5mm for compacted snow.

1. 研究背景と目的

世界中の積雪滑走路での滑走路逸脱事故を鑑み、滑走路状態を評価する方法が検討・研究されている¹。アメリカ合衆国イリノイ州シカゴ・ミッドウェー空港におけるサウスウエスト航空1248便のオーバーラン事故では、滑走路上に雪や氷があったために着陸に必要な距離が増加し、BBCによる報道²によれば、前輪が壊れた機体は空港外周のフェンスを突き破り、車に衝突して車中の6歳の子供が死亡した。この事故以降に、国連の専門機関であるICAO（International Civil Aviation Organization：国際民間航空機関）は、滑走路路面状況を6段階に分けたRWYCCを作成した³。RWYCC（表1）は滑走路の状態を数値で示し、航空機の離着陸の判断基準として使用されている。この数値が高いほど滑走路の状態が滑りにくい状態を示す。現在、RWYCCは人によって観測、離着陸判断が行われている。しかし、この観測方法では滑走路の閉鎖や観測結果のばらつきが運行効率の低下を招いている。この解決策として、滑走路上の積雪深や雪質をリアルタイムに計測する滑走路埋設型センサGLASS（Ground LAsEr Sensor for Snow monitoring）が開発され、雪質や雪厚やRWYCC等の推定が可能となった。しかし、現センサのRWYCC判定精度のうち比較的滑走路が滑りやすいRWYCCの2,3における精度が低い。これは判定精度が雪厚3mm未満の計測精度に依存するためである。つまり、雪厚3mm未満の極端に薄い雪氷に対して高い精度が求め

られる。そこで本研究では、滑走路除雪後を想定した圧雪しまり雪と圧雪する前の状態である乾雪しまり雪の3mm未満の雪厚推定を目的とする。

表1 RWYCC. ICAO³を参考に著者が作成。

滑走路状態	RWYCC
DRY	6
FROST	
WET (3mm 以下)	
SLUSH (3mm 以下)	5
DRY SNOW (3mm 以下)	
WET SNOW (3mm 以下)	
COMPACTED SNOW (外気温-15°C 以下)	4
WET (滑りやすく濡れた)	
DRY SNOW (3mm 以上)	
WET SNOW (3mm 以上)	
DRY SNOW ON TOP OF	3
COMPACTED SNOW	
COMPACTED SNOW (外気温-15°C 以上)	
STANDING WATER (3mm 以上)	2
SLUSH (3mm 以上)	
ICE	1
WET ICE	
WATER ON TOP OF	
COMPACTED SNOW	0
DRY SNOW OR WET SNOW	
ON TOP OF ICE	

¹北見工業大学大学院 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

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

2. 実験概要

2. 1 滑走路埋設型センサ GLASS

実験では GLASS を使用し、積雪底面における後方散乱光測定実験を行った。GLASS とは滑走路に埋設し積雪底面に近赤外および可視光のレーザー光を照射し、後方散乱光をカメラで撮影する装置である。

2. 2 実験方法

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行った。実験に使用した雪(2023年2月)は野外で採取した自然降雪を -75°C 程度の冷凍庫で保管し、2023年7月と10月の実験期間(7日間)において使用した。図1にケースの断面図を示す。ケースは140mm四方で、厚さは1mm, 2mm, 3mm, 5mmの4種類である。底には厚さ約5mmの反射防止コーティングを施したガラス板をはめ込み使用する。図2に粒径写真を示す。図2上部の赤色三角形の左側が $2\times 2\text{mm}$ で、右側が $1\times 1\text{mm}$ であり、粒径は $0.1\sim 0.5\text{mm}$ である。

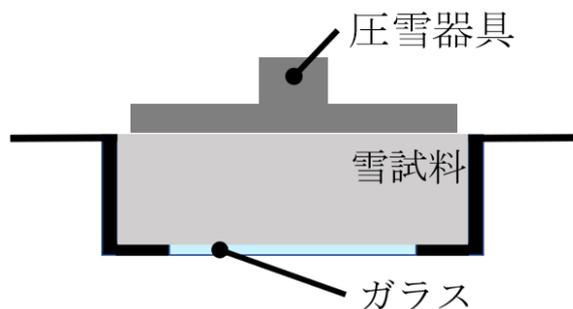


図1 圧雪器具とケースの断面図

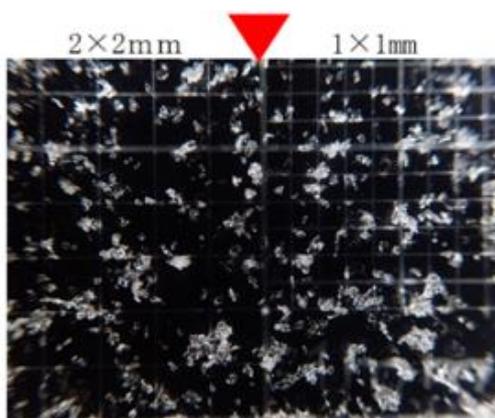


図2 乾雪しまり雪の粒径写真

2. 3 雪試料の再現方法

乾雪しまり雪で、雪厚2mm以上では、粒径よりも一回り大きいふるいを用いてケースに雪試

料を充填した。ケースの高さを越えた雪を薄い金属板ですり切り、実験試料を作成した。雪厚1mm以下は、雪厚2mm以上と同様に作成すると、金属板ですり切ったときにガラス表面を滑り全くなかった。そこで、雪粒子を刷毛につけ、ふるい落としながらケースに充填した。このとき、雪粒子が重なると1mmを超えてしまうため、目視で調整を行った(図3)。1mmの雪試料は、隙間が多いが2mm以上と密度で統一している。圧雪しまり雪はアクリル板に持ち手を付けた圧雪器具(図1)を作成し、ケースの高さを越えた雪を人力で押し固め作成した。密度は 300kg m^{-3} 以上を圧雪しまり雪、それ以下を乾雪しまり雪とした。

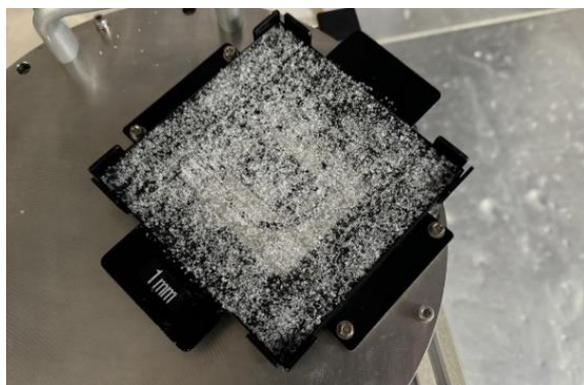


図3 雪厚1mmの雪試料の一例

3. 解析概要

3. 1 雪試料内での散乱

図4に入射光子の予想経路⁵⁾を描いたGLASSによる雪氷観測モデルを示す。粉末や粗い表面の試料からの散乱現象は、単散乱現象とは様相が異なると述べられている⁴⁾。本研究では、画像解析から得られた半値幅と雪厚を解析するため、積雪内部に入射した光子の挙動を推定する。積雪内に入射した光子は、積雪底層で全反射する鏡面反射成分と、内部に潜り込む拡散反射成分に分かれる。

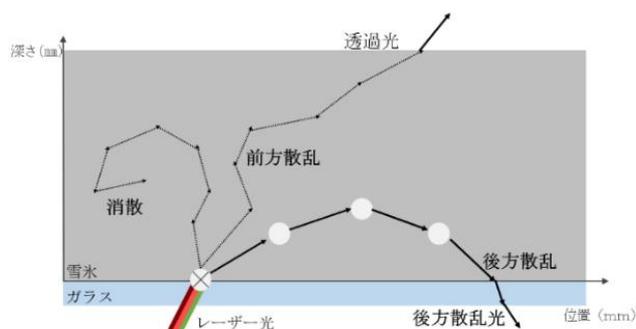


図4 GLASSによる雪氷観測モデル。光散乱モデル⁵⁾を参考に作成。

拡散反射成分のうち、入射光子は以下の3通りの散乱を行う。

- ①消散：散乱を繰り返し内部で消滅。
- ②透過光：前方散乱を繰り返し雪氷を透過。
- ③後方散乱光：レーザー照射側で観測される光。

3. 2 半値幅

本研究では、取得画像(図5)を縦軸方向に積算し、得られた積雪の散乱光強度と発生位置のグラフ(図6)から最大の強度値を特定した。この最大値を2で割って半値を求め、幅の画素数を合計することで半値全幅 FWHM を求めた。極大値に対する分布が対称な場合には、極大値位置から半値幅までの距離を用いることがある。こちらは半値半幅と呼ばれ、HWHM と略される⁶⁾。本研究では非対称で凹凸が発生している(図6)ため、半値全幅を半値幅とした。半値幅を用いた理由は、散乱光強度が中央から離れるに従って減少するため、散乱光強度の全体的な形状を捉える指標になると考えたからである。また、半値幅を用いることで非対称性と凹凸の影響を軽減し、各雪厚における散乱光強度の変化が評価できると考えた。

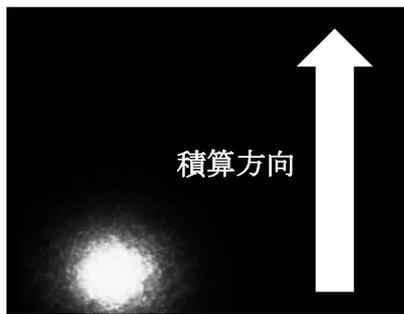


図5 GLASS 取得画像の一例

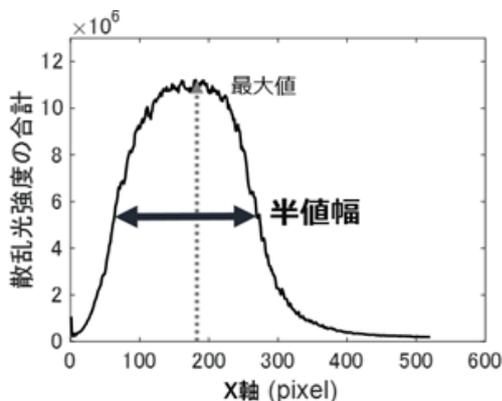


図6 積雪の後方散乱光強度と後方散乱光発生位置の関係

4. 解析結果

取得データ数は表2に示す。図7(a)に示す圧

雪しまり雪は、雪厚の増加に伴い半値幅も指数関数的に増加しており、これは後方散乱光も増加していることが考えられる。圧雪しまり雪は乾雪しまり雪と比較して1~5mmにおいて半値幅の平均値が増加傾向である。密度が大きくなることで平均は25 pixel 増加し、箱が減少した。

図7(b)に示す乾雪しまり雪は1mmから3mmでは箱の重複が見られ、外れ値が発生した。3mmと5mmでは平均値の違いが大きい結果となった。

表2 取得データ数

雪厚	乾雪しまり雪	圧雪しまり雪
5mm	15	8
3mm	24	8
2mm	25	8
1mm	20	12
0mm	17	

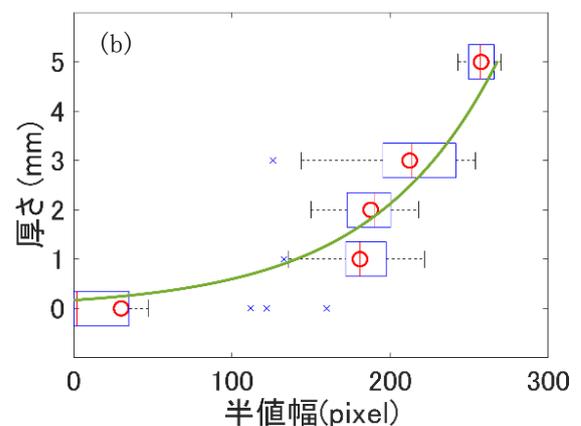
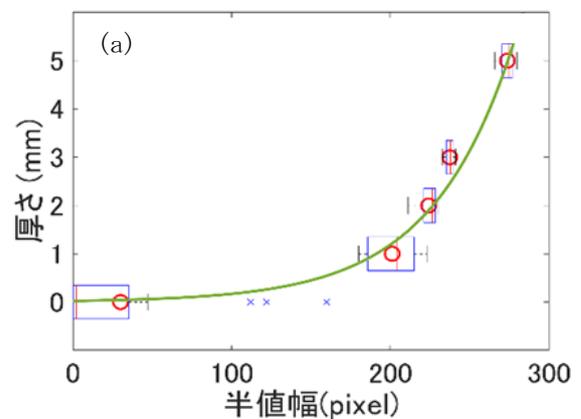


図7 (a) 圧雪しまり雪の半値幅と厚さの関係
(b) 乾雪しまり雪の半値幅と厚さの関係

5. 考察

図8に積雪内部の光伝播概念図を示す。図8(a)は図4に雪粒子を加えた圧雪しまり雪の場合を示している。密度が増加することで入射光子が雪粒子に衝突する回数が増加し、透過光が減少するため1mmごとに増加傾向が見られたと考えられる。また、深くまでもぐりこんだ光子が後方散乱に転じるため乾雪しまり雪よりも半値幅が増加したと考えられる。これらの特徴から圧雪しまり雪では1mmごとの判別の可能性を見いだせた。

図8(b)に図4に雪粒子を加えた乾雪しまり雪の光伝播概念図を示す。乾雪しまり雪は圧雪しまり雪から密度が減少するため散乱回数も減少し雪厚1mmから3mmでは前方散乱を繰り返し、雪試料を透過する。観測されるのは鏡面反射成分や積雪底層において数回で後方散乱に転じた光子のみであると考えられる。5mmへ雪厚が増加することで後方散乱光が増加し半値幅の増加に

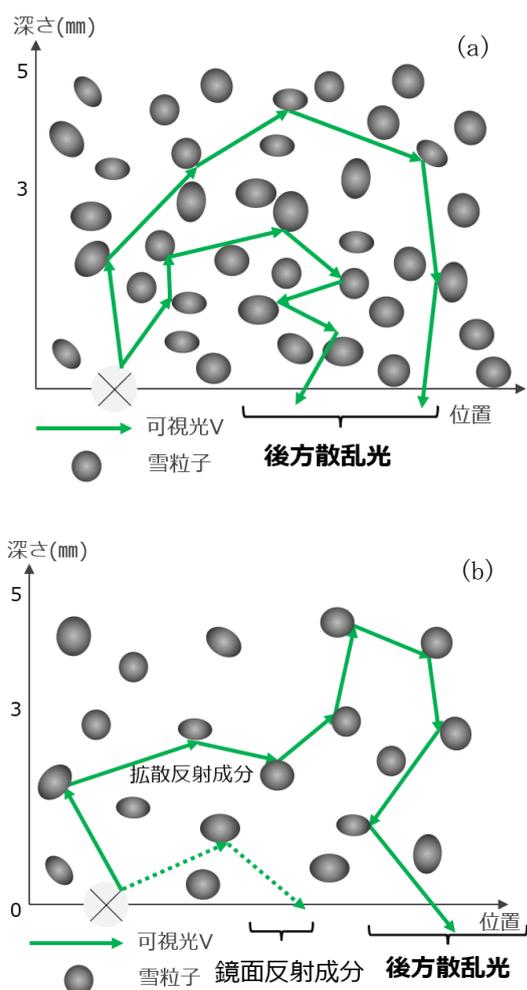


図8 雪の光伝播概念図.

(a) 圧雪しまり雪, (b) 乾雪しまり雪

起因したと考えられる。これらの特徴から乾雪しまり雪では5mmと3mm未満の2種推定の可能性を見いだせた。

6. まとめ

本研究では5mmと3mm未満の雪厚推定を目的とした。各雪厚における半値幅の違いから、半値幅は厚さの増加に伴い指数関数によって近似でき、圧雪しまり雪で半値幅の散らばりが小さく、乾雪しまり雪で半値幅の散らばりが大きいことがわかった。これらの特徴から乾雪しまり雪で3mm未満と5mmの雪厚2種推定、圧雪しまり雪で1mm, 2mm, 3mm, 5mmの雪厚4種推定の可能性を見いだせた。

【参考文献】

- 1) 国土交通省(2021): 第43回ATSシンポジウム②URL:http://atcaj.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2021/11/2021_ATS_Symposium_2_new.pdf(2024年7月4日閲覧)
- 2) BBC NEWS. Boy dies as jet skids off runway (2005年12月9日)
URL:<http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/4512360.stm>(2024年7月4日閲覧)
- 3) ICAO GLOBAL REPORTING FORMAT
URL:https://www.icao.int/safety/SiteAssets/Pages/GRF/RCAM%20Poster_v1.0.pdf(2024年7月4日閲覧)
- 4) レーザーハンドブック II編光学の基礎 6.7 光波の多重散乱 1クベルカ・ムンク理論による拡散反射 (レーザー学会編)
URL:<https://optipedia.info/laser/handbook/laser-handbook-2nd-section/6-7/>(2024年7月4日閲覧)
- 5) 積雪による光散乱のモンテカルロシミュレーション解析 原田康浩ら(2015): 雪氷研究大会 (2015 松本) 講演要旨集 B2-7
URL:https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcsir/2015/0/2015_52/_pdf/-char/ja(2024年7月4日閲覧)
- 6) 天文学辞典 観測技術 共通基礎 半値全幅 (日本天文学会)
URL:<https://astro-dic.jp/full-width-at-half-maximum/>(2024年7月4日閲覧)