

マイクロ波放射計を用いた圧雪路面識別の検討

Discrimination of compacted snow-covered road surfaces using microwave radiometer

徳本 拓海¹, 館山 一孝²

Tokumoto Takumi¹, Kazutaka Tateyama²

Corresponding author: m3255200205@std.kitami-it.ac.jp(T. Tokumoto)

¹ 北見工業大学大学院 工学専攻, ² 北見工業大学 先進工学科

¹ Graduate School of Engineering, Kitami Institute of Technology, ² Department of Integrated Engineering, Kitami Institute of Technology

This study investigated the influence of snow density on microwave emission characteristics for discriminating compacted snow-covered road surfaces. Four road surface conditions—dry pavement, icy pavement, dry snow, and compacted snow—were observed using a portable microwave radiometers. Polarization Ratio (PR), Gradient Ratio (GR), and Cross-Polarization Gradient Ratio (XGPR) were employed as classification features. The results revealed distinct differences between dry snow and compacted snow, attributable to snow-density-dependent variations in microwave emission characteristics across frequencies and polarizations. These findings suggest that compacted snow can be effectively discriminated using a combination of PR, GR, and XGPR.

1. はじめに

冬季の空港では、航空機の安全運航を確保するため、滑走路の雪氷状態を正確に把握することが重要である。現在、滑走路状態の観測は作業員が滑走路へ立ち入り、目視によって実施されている。しかしながら、この方法では観測のために滑走路を一時的に閉鎖する必要があり、時間的・経済的な負担が生じる。また、限られた時間内で広大な滑走路の路面状態を把握しなければならないため、雪氷分布を十分に把握しきない可能性がある。滑走路上に雪氷が残留すると航空機の走行性能が低下し、逸脱事故のリスク増加が懸念される¹⁾。

これまで、滑走路の雪氷状態を把握する手法として、滑走路埋設型センサである GLASS を用いた雪氷分類が行われている²⁾。しかしながら、GLASS はセンサ直上のみを観測対象とするため、滑走路全体の状態を面積に把握することは困難である。一方、マイクロ波放射計は非接触かつ面的な観測が可能であり、滑走路全体の雪氷状態を効率的に把握できる手法として期待されている。

マイクロ波放射計を用いた雪氷分類についても研究が進められており、既往研究では表面温度を用いずに5種類の雪氷路面の状態の判別を行ったことが報告されている³⁾。しかし、その分類では雪の密度の違いは考慮されておらず、乾雪と圧雪を区別することは困難であった。圧雪

は乾雪よりも密度が高く、摩擦係数が低いいため、航空機の走行安全性の観点から両者を識別することは重要である。

本研究は、乾燥したアスファルト路面(乾燥路面)、自然積雪が融解しその後凍結した路面(凍結路面)、自然積雪の路面(乾雪路面)の3種類の路面状態から圧雪路面識別の可能性を評価することを目的とした。

2. 観測と解析の概要

2. 1 使用機器

マイクロ波放射計は、物体から自然放射されるマイクロ波帯の電磁波を受信し、その強度を輝度温度(Brightness Temperature) TB として観測する受動型センサである。電磁波の偏波特性を利用し、垂直偏波(V偏波)および水平偏波(H偏波)の TB が観測される。V偏波とH偏波では路面からの放射特性が異なるため、それらの差や比を用いることで路面状態に関する情報を抽出できる。特に、雪や氷のような誘電率が異なる物質では偏波ごとに放射特性が変化することから、雪氷路面の識別への活用が期待されている。

本研究では表1に示す三菱電機特機システム社製の可搬型のマイクロ波放射計 MMRS2 を使用した。MMRS2 にはマイクロ波放射計に加えて、赤外温度計およびカメラを搭載しており、観測対象の TB 、表面温度、可視画像を同時に取得する

表1 マイクロ波放射計 MMRS2 の観測諸元

周波数	6.9GHz	18.7GHz	36.5GHz
ビーム幅	15°	10°	5°
偏波	垂直偏波(V)と水平偏波(H)		

ことができる. 6GHz, 18GHz, 36GHz の周波数域を持つ3種類のMMRS2を使用した.

2. 2 観測方法

観測は北見工業大学構内の滑走路を模した試験アスファルト路面において実施し, 2024年から2026年に取得した観測データを解析した. 実験には自然降雪を使用し, 図1に示す4種類の乾燥路面, 凍結路面, 乾雪路面および圧雪路面の4種類の路面状態を対象として観測を行った.

乾燥路面は雪氷のないアスファルト路面, 凍結路面はアスファルト表面が凍結した路面とした. 乾雪路面は凍結路面上に自然降雪が堆積した状態, 雪路面は乾雪をスコップで圧縮した状態と定義した. なお, 研究では積雪密度が 0.25 g/cm^3 以上を圧雪と定義した.

観測手順は, 最初にMMRS2に物理温度が既知の電波吸収体を測定して輝度温度との差が十分に小さいことを確認し, 次にMMRS2を天空に向けて天空放射を測定した. 最後に図2に示すように, MMRS2の入射角を 50° に設定して粗面の測定を行った⁴⁾.

2. 3 解析概要

本研究では, マイクロ波放射計で取得した TB および表面の赤外温度 T_{sur} のデータを15秒間で平均した値を解析に用いた. 放射率 e は, 天空放射 TB_{sky} の影響を補正するため, 式(1)を用いて求めた.

$$e = \frac{TB - TB_{sky}}{T_{sur} - TB_{sky}} \quad (1)$$

次に, 式(2)~(4)より e と TB から偏波比 PR_f , 周波数比 GR_{f1pf2p} , および直交偏波周波数比 $XGPR_{f1p1f2p2}$ を式(2)~(4)より算出した.

$$PR_f = \frac{TB_{fV} - TB_{fH}}{TB_{fV} + TB_{fH}} \approx \frac{e_{fV} - e_{fH}}{e_{fV} + e_{fH}} \quad (2)$$

$$GR_{f1pf2p} = \frac{TB_{f1p} - TB_{f2p}}{TB_{f1p} + TB_{f2p}} \approx \frac{e_{f1p} - e_{f2p}}{e_{f1p} + e_{f2p}} \quad (3)$$

$$XGPR_{f1p1f2p2} = \frac{TB_{f1p1} - TB_{f2p2}}{TB_{f1p1} + TB_{f2p2}} \approx \frac{e_{f1p1} - e_{f2p2}}{e_{f1p1} + e_{f2p2}} \quad (4)$$

ここで, f は観測周波数, p は偏波を表す.

これらの識別指標を用いて, 各路面の特徴を評価するとともに, 圧雪路面識別への適用可能性を



図1 観測対象とした4種類の路面状態
(a)乾燥路面 (b)凍結路面 (c)乾雪路面
(d)圧雪路面

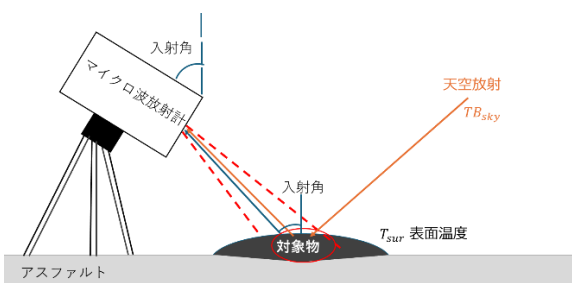


図2 天空放射の影響を考慮したマイクロ波放射計による路面観測の概念図

検討した.

3. 結果

図3に各路面における TB の平均値を示す. エラーバーは観測値の最大値および最小値を表している. 全周波数において, 圧雪路面は比較的高い TB を示し, 凍結路面は低い値, 乾雪路面は両者の中間的な値を示した. しかし, 各路面の観測範囲には重複がみられ, TB のみでは圧雪路面を他の路面から明確に識別することは困難であった.

図4に各路面における e の平均値を示す. エラーバーは図3と同様である. 圧雪路面は全周波数において最も高い e を示し, 凍結路面は全周波数において最も低い値を示した. 乾雪路面は両者の中間的な値を示し, e を用いることで各路面間の差が TB よりも明瞭となった. 特に, 圧雪路面は全周波数で乾雪路面より高い e を示した. 一方, e の変動範囲には一部重複が認められ, 特に圧雪路面と乾雪路面では周波数によって観測範囲が重なったことから, e のみでは完全な識別は

困難であった。

図 5 は PR_{36} と $XGPR_{6V36H}$ の関係を示す。図中のプロットは各路面の平均値、エラーバーは標準偏差を表す。乾燥路面では PR_{36} および $XGPR_{6V36H}$ がともに低い領域に分布し、他の路面と明確に区別された。圧雪路面は高い PR_{36} 値と中程度の $XGPR_{6V36H}$ 値を示し、乾燥路面および凍結路面とは異なる領域に分布した。一方、凍結路面と乾雪路面は近接した領域に分布し、標準偏差を考慮すると両者には一部重複がみられた。また、圧雪路面と乾雪路面の分布も一部重なったものの、平均値では圧雪路面が明確に区別された。以上より、 PR_{36} と $XGPR_{6V36H}$ の組み合わせは圧雪路面識別に有効であることが示された。

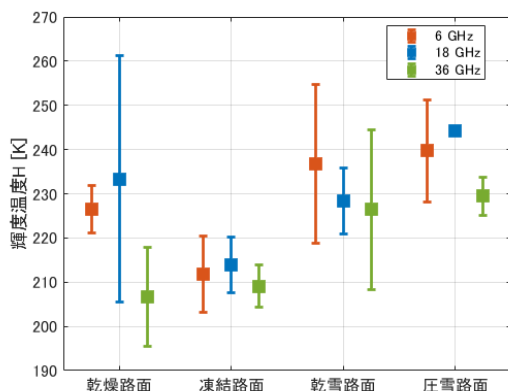


図 3 各路面における 6, 18 および 36GHz の輝度温度の平均値

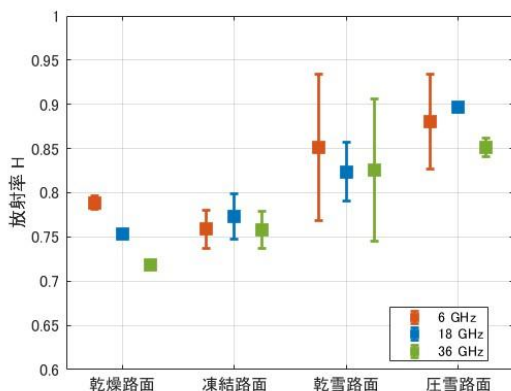


図 4 各路面における 6, 18 および 36GHz の放射率の平均値

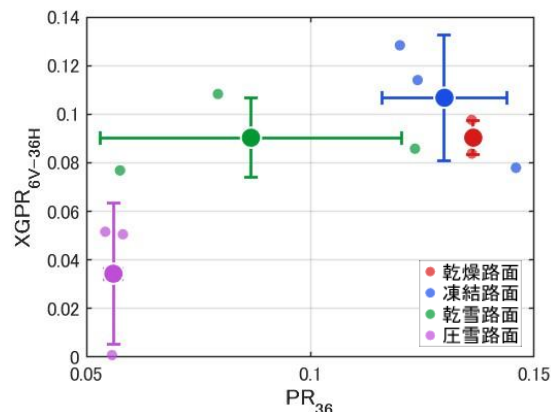


図 5 各路面における PR_{36} と $XGPR_{6V36H}$ の関係。

4. 考察

圧雪路面は全周波数において比較的高い TB を示した。これは、圧雪化により雪粒子間の空隙が減少し、積雪密度が増加したことでマイクロ波放射特性が変化したためと考えられる。一方、凍結路面は全周波数において最も低い輝度温度を示した。氷は雪よりもマイクロ波帯の反射率が高く、放射されるマイクロ波帯のエネルギー量が相対的に小さいことが要因と考えられる。しかし、乾雪路面と圧雪路面では TB の変動範囲が重複しており、 TB のみでは圧雪路面を安定して識別することは困難であった。

e においては、圧雪路面が全周波数において最も高い値を示し、路面間の差異は TB よりも明瞭となった。 e は TB を T_{sur} および TB_{sky} で補正した指標であるため、雪氷の誘電特性をより適切に反映したのと考えられる。圧雪では雪粒子間の空隙が減少し積雪密度が増加するため、乾雪とは異なる誘電特性を示し、その結果として高い e が得られたと考えられる。一方、 e においても観測範囲の重複が認められたことから、 e 単独では圧雪路面を完全に識別することは困難であった。

PR_{36} と $XGPR_{6V36H}$ を組み合わせた結果、各路面は異なる領域に分布し、特に圧雪路面は高い PR_{36} 値を示し、他の路面とは異なる特徴を示した。 PR_{36} は偏波による路面の誘電特性や表面状態の違いを反映し、 $XGPR_{6V36H}$ は偏波情報と周波数情報を同時に利用できるため、単一の識別指標では得られない情報を抽出できる。その結果、図 3 および図 4 でみられた路面間の重複が減少し、圧雪路面の識別性能が向上したと考えられる。

一方で、乾雪路面と凍結路面には標準偏差の重複がみられた。これは、雪質、雪厚および密度のばらつきによってマイクロ波放射特性が変化したためと考えられる。しかし、圧雪路面は他路面と比較して独立した領域に分布したことから、 PR_{36} と $XGPR_{6V36H}$ の組み合わせは圧雪路面の識別に有効な指標であることが示唆された。

Proceedings of SPIE, **8533**, 853307.

5. まとめ

本研究では、可搬型マイクロ波放射計を用いて乾燥路面、凍結路面、乾雪路面および圧雪路面の放射特性を解析し、圧雪路面識別の可能性を検討した。その結果、輝度温度のみでは路面間の重複がみられ、圧雪路面を安定して識別することは困難であった。一方、天空放射と路面温度から補正した放射率を用いることで路面間の差異がより明瞭となり、圧雪路面の特徴を適切に抽出できることが確認された。さらに、 PR_{36} と $XGPR_{6V36H}$ を組み合わせを用いることで路面間の分離性能が向上し、圧雪路面識別に有効な指標であることが示された。

今後は観測データを蓄積するとともに、異なる積雪条件や気象条件における検証を進め、識別精度のさらなる向上を図る予定である。

【謝辞】

本研究は、研究開発法人宇宙航空研究開発機構との共同研究「マイクロ波センサを用いた空港滑走路上の雪氷被覆率推定技術の開発」の一環として実施した。ここに記して、関係各位に深く感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) International Civil Aviation Organization (2021): *Global Reporting Format for Runway Surface Conditions*. ICAO, Montreal, Canada.
- 2) 依田明洋, 舘山一孝, 田中康弘, 守田克彰 (2024): 滑走路埋設型センサを用いた極端に薄い雪氷の推定, 北海道の雪氷, **43**, 57–60.
- 3) 田中康弘, 舘山一孝 (2024): Analysis of Microwave Radiometry of Snow and Ice on an Outdoor Experimental Asphalt Surface, *IEEE Sensors Letters*, **99**, 1–4.
- 4) Kasahara, M., Imaoka, K., Kachi, M., Fujii, H., Maeda, T., Ito, N., Nakagawa, K., and Oki, T. (2012): Status of AMSR2 on GCOM-W1,