

論文

マイクロ波放射計を用いた路面状態 自動判別システムの開発

渡邊直樹¹⁾*, 榎本浩之¹⁾**, 舘山一孝¹⁾, 山本朗人²⁾,
田中聖隆²⁾, 高橋修平¹⁾, 岩本明子²⁾, 佐々木亮介¹⁾,
ヌアスムグリ アリマス¹⁾

要 旨

寒冷地における冬期交通事故の主な原因である雪氷路面状態を自動判別するシステムの開発をした。このシステムでは路面から放射されているマイクロ波放射（輝度温度）および路面温度の相関から路面状態を判別する。さらに、路面状態の時間変化過程を観察し、より精度よく路面状態を判別する。本研究ではまず実験路面で基礎実験を行い路面状態に応じた輝度温度の範囲を調べた。次に大雪山系石北峠で実際の路面モニターと測定を一冬通して行った。この実験より、多様に变化する路面状態とそれに対応した輝度温度の範囲が詳細にわかった。この実験で得られたデータを用いて路面状態判別基準を作成した。観測視野内が単一の路面状態で占められる場合の一致率はいずれの路面状態においても 90% 以上になった。一致率の検討に使用できなかった降雪中および混在路面のデータは 48% にも達しており、今後は各路面の混在比率に対応したマイクロ波放射モデルを構築するなど、全路面に対応した手法の開発が課題である。

キーワード：マイクロ波放射計，路面凍結

Key words: passive microwave radiometer, road freezing

1. はじめに

冬期の道路気象情報は交通に与える影響が大きい。視界状況と路面状態の情報が重要であり（加治屋ら，2006），これらの情報を的確に提供することでドライバー自身の判断により危険の回避ができる。冬期の路面状態のうち雪氷路面はすべりやすく危険なため，雪氷路面の把握が重要である。また，除雪や融雪剤散布など冬期路面を効率

的に管理するためにはリアルタイムで道路状況を把握する必要があり（北海道開発局，1997），北海道では ITS（Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム）の一環として，2006 年より気象予報や熱収支法等を用いた凍結予測と情報提供を行う冬期路面管理支援システムが運用されている（高橋ら，2007）。このような ITS において，常時路面状態を把握できるセンサーが重要な役割を担っている。また，多岐に渡る道路網の全ての路面状態を把握することは困難であり，より効率的に把握できる路面凍結センサーは重要である。

これまでの路面凍結センサーは可視光線（村田ら，2006）や赤外線（本間・稲垣，2006）など比較的波長の短い電磁波帯を利用している。そのため，悪天候時には光線が消散され減衰が顕著にな

1) 北見工業大学

〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

2) 三菱電機特機システム株式会社

〒247-0065 神奈川県鎌倉市上町屋 730 番地 11

* 現在：株式会社そうけん

〒093-0017 網走市南 7 条西 4 丁目 7-3

** 現在：国立極地研究所

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

り路面状態の観測が困難になる。マイクロ波は比較的波長が長い散乱による減衰が小さく、悪天候時の路面状態でも捉えることができる。視程がほとんどない猛吹雪の際に、路上に停車している車両を路側帯の構造物に設置したミリ波レーダーで捉え、後続車両に注意を喚起するシステムが実用化され始めているが(加治屋, 2006), 路面状態を検知するセンサーとしての利用は行われていない。マイクロ波放射計は対象物の表面状態とその下層の路面状態を見ることができ、表層の積雪を透過して積雪下層の路面状態も判別できる。また、マイクロ波は水に反射されやすい性質があり、水膜のような少量の水分にも敏感に反応する(古漬ら, 1986)。そのため、非常に危険な路面状態である表面に水膜を形成した凍結路面を捉えやすい。

本研究では ITS への寄与を目的として、マイクロ波放射計と赤外放射温度計を利用した路面状態自動判別システムの開発を行った。北見工業大学構内にて基礎実験を行い、この実験結果を踏まえて石北峠 7 合目の幹線道路において本実験を行った。各路面状態におけるマイクロ波放射や赤外放射の結果と判別手法の精度について報告する。

2. マイクロ波放射による路面状態の識別

すべての物質は、それぞれ固有の性質として電磁波を放射、吸収、透過および反射する。物質はその内部状態の変化に応じた固有の波長の電磁波を放射、吸収する(日本リモートセンシング研究会, 1992)。これを利用して、路面状態毎に異なる電磁波放射の違いを捉え路面状態の判別を行う。ある物質のある状態の放射エネルギーは波長と温度によって定まる。ここで、放射率はある波長に対して式(1)で定義される。

$$\varepsilon = E_G / E_B \quad (1)$$

ここで、 ε は放射率、 E_G は観測物体の放射エネルギー、 E_B は観測物体と同温の黒体の放射エネルギーである。

放射率は、物質の誘電率、表面の粗さ、温度、波長、観測方向などの条件によって変化し、0 から 1 の間の値を取る。観測物体の放射エネルギー

と等しい放射エネルギーを放射する黒体温度を輝度温度(TB : Brightness temperature, 単位 [K])といい、観測物体の温度に放射率を乗じた温度が TB になる。本研究は、マイクロ波放射計から出力される TB を用いて路面状態の判別を行った。本研究では、路面状態を路面上の氷雪の有無などによって乾燥路面、湿潤路面、凍結路面、圧雪路面の 4 種類に分けた。路面状態の変化は放射率を変化させ、これに伴い TB も変化する。これらの特性を利用し、本研究ではマイクロ波放射の TB から路面状態をより精度よく判別する手法の開発を目指した。

3. 屋外模擬路面実験

3.1 観測概要

北見工業大学(北海道北見市)構内の路上において、基礎的な路面観察実験を行った。本実験で使用した装置は、三菱電機特機システムと北見工業大学が共同で冬季路面などの野外観測に適した構造を検討開発した可搬型マイクロ波放射計 MMRS2 (Microwave/Milliwave Radiometer System 2) と HORIBA 社製の赤外線放射温度計 IT-550L である。MMRS2 および IT-550L の機能・性能は表 1 に示す。

MMRS2 は 6GHz, 18GHz の 2 周波の機体を使用した。観測路面に対し入射角度 45 度で設置することで、偏波を測定した。6GHz の垂直偏波 (6V) と 18GHz の水平偏波 (18H) を測定し、合計 2 チャンネルで実験を実施した。観測温度精度は 6GHz, 18GHz とともに 1K, 観測視野角はそれぞれ 15 度, 10 度である。

18GHz は波長が短いため浸透深さが浅く表面状態の計測に適している。特に水平偏波は液体の水に敏感であり、水膜の検出が期待できる。一方、6V は比較的波長が長く垂直偏波であるため浸透深さが深く、下層の状態を捉えやすい。以上の波長と偏波の組み合わせにより積雪の有無とその下層の路面状態を判別する。MMRS2 は路面の放射エネルギーを測定し輝度温度 (TB) を出力する。以下、6V の TB を TB_{6V} 、18H の TB を TB_{18H} と表示する。

IT-550L の観測周波数は 19-37 THz, 観測温度精度および観測視野角はそれぞれ 2K, 2 度であ

表 1 マイクロ波放射計 MMR2 と赤外放射温度計 IT550L の緒元

項 目		マイクロ波放射計 MMR2		赤 外 放 射 温 度 計
		6GHz-V	18GHz-H	IT-550L
共 通 規 格	観 測 周 波 数	6.925±0.2GHz	18.7±0.35GHz	19-37THz
	温 度 分 解 能	0.5 K		0.1 K
	温 度 精 度	1 K		2 K
観 測 視 野 角	北 見 工 業 大 学 構 内	15 度	10 度	2 度
	石 北 峠	19 度	18 度	

る。IT-550L は路面からの赤外放射エネルギーを測定し温度を出力する。設置角は MMR2 同様 45 度とし、射出率を 1.00 に固定して観測を行い、本研究では観測路面の表面温度として使用した。以下、赤外放射から測定した路面温度を IR と表示する。同時に MMR2 の内蔵 CCD カメラで路面の画像を取得し、観測路面の状態判別を使用した。

大学構内における屋外実験では、人工的に路面状態（乾燥、湿潤、凍結、圧雪）を造成しこれを観測した。マイクロ波放射計のサンプリング時間設定は 400 msec でデータ取得は 1 秒間隔にした。データ 1 セットにつき約 10 データ取得した。これを各路面に複数セット行った。また、湿潤路面から凍結路面へ路面状態を変化させる実験も行った。データ取得は 1 秒間隔で連続的にを行い、路面状態の変化に伴う TB の変化を測定した。

3.2 観測路面について

図 1 は北見工業大学構内実験で観測した路面状態の例である。乾燥した路面が露出した状態を乾燥路面（図 1 左上）とし、乾燥路面に散水し濡れた状態を湿潤路面（図 1 右上）とした。路面上の水分が凍結した状態が凍結路面（図 1 左下）であり、凍結路面は水の厚さによって氷膜（1 mm 未満）と氷板（1 mm 以上）とに分けられる（北海道開発局, 1997）。凍結路面は初期状態において黒色を呈しているが厚さが増すことで白に帯びてくる。図 1 左下は凍結路面（氷板）で、冬期に出現する危険な路面状態である。路面上の雪を踏み固めた状態を圧雪路面（図 1 右下）とした。図 1 右下の圧雪路面は人力で踏み固めたもので、

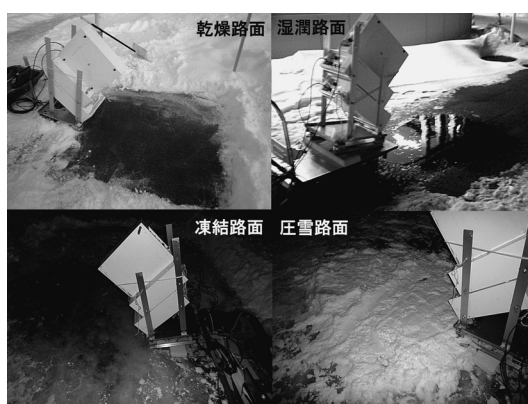


図 1 北見工業大学構内の路上で観測した路面状態の例。左上が乾燥路面，右上が湿潤路面，左下が凍結路面，右下が圧雪路面。

車両が踏み固めるものより柔らかい状態の圧雪路面であった。凍結路面と同様に冬期出現する危険性の高い路面状態である。湿潤路面から凍結路面へ路面状態を変化させる実験では、散水後およそ 30 分で一部が凍結し始め、およそ 1 時間で完全な凍結路面（氷膜）が出現した。

3.3 観測結果

図 2 (a) に乾燥路面に散水して湿潤路面が次第に凍結していく過程の IR の時間変化を示す。散水直後の IR は 274.5 K を示し、時間の経過とともに低下して約 40 分後に 273.0 K となり、その後しばらく一定の値を示した。このとき、路面は水と氷の混相状態であったと考えられる。

図 2 (b) の散布図は観測した各路面状態における TB を示している。縦軸に TB_{6V} 、横軸に TB_{18H} をとった。湿潤路面は TB_{6V} 、 TB_{18H} ともに低い値

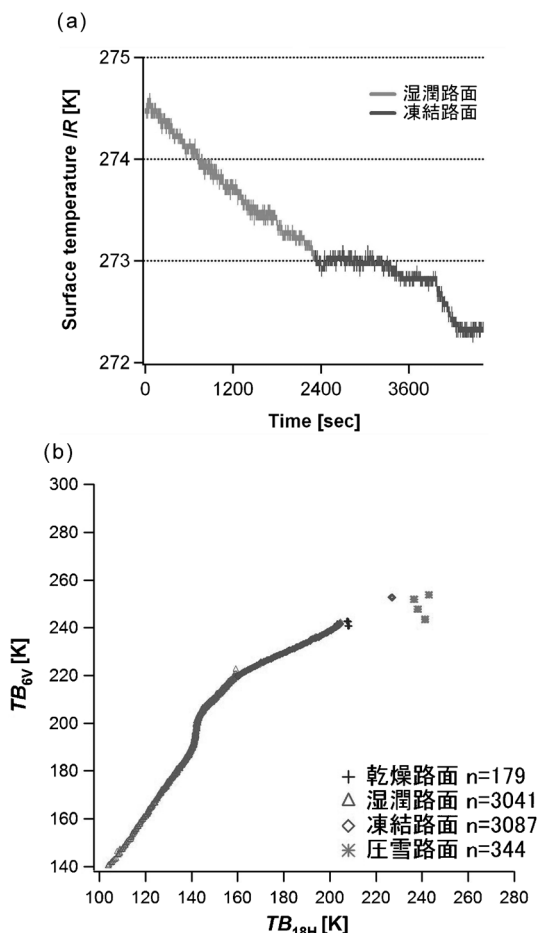


図 2 北見工業大学構内の路上の観測結果。
 (a) 湿潤から凍結までの路面温度 IR の時間変化。
 (b) 各路面状態の輝度温度分布図。凡例の n はデータ数を表す。

を示し、 TB_{6V} は 140–210 K、 TB_{18H} は 100–150 K と TB_{6V} よりも 50 K 程度も低い値を示した。凍結路面の TB_{6V} は 210–250 K、 TB_{18H} は 150–240 K と、湿潤路面よりも 40–90 K 高い値を示し、凍結が進むにつれ両 TB の差は小さくなった。乾燥路面では TB_{6V} と TB_{18H} との差が 10 K 程度に減少し、乾燥路面の TB はそれぞれ約 240 K (TB_{6V})、約 230 K (TB_{18H}) とほぼ一定の値を示した。圧雪路面も 240–250 K (TB_{6V}) と 230–250 K (TB_{18H}) と比較的狭い範囲の値を示した。両路面の TB は近い値ではあるが、圧雪路面の方が概ね 10–20 K 程度高い値を示した。

以上より、観測した路面状態によって TB が異

なりそれぞれの測定データがまとまった集合を形成することがわかった。湿潤路面の TB は他の路面よりも顕著に低い値を示すため、判別が容易である一方、圧雪路面は凍結路面と近い値であるため、凍結路面と判別する TB の値の設定が難しい。乾燥路面と凍結路面（氷膜）の TB はほぼ同程度であるが、これは 6 V と 18 H が薄い氷膜を透過してしまってその下の乾燥路面からの放射を測定していると考えられる。このため 273 K 以下の乾燥路面と氷膜路面の判別を TB 分布からのみで判別することは難しい。この点の改良について 7 章で述べる。

4. 石北峠実験

4.1 石北峠について

大学構内で行った基礎実験より、路面状態毎に得られる TB の範囲がそれぞれわかり、マイクロ波による路面状態判別の基礎情報を取得することができた。この知見をもとに石北峠において実際の路面状態と TB および IR の観測を行った。

石北峠は北海道の中央部に位置し、北見市と旭川市をつなぐ国道 39 号線の幹線道路で大雪山系にある峠である（図 3）。観測地点は北見側 7 合目（標高 936 m）付近（図 4 の丸印部分）であり、観測期間中の最低気温は -18.7°C であった。この場所には北見道路事務所が管理する視程計や路面状況観測カメラ等が設置された鉄塔が建っており、この鉄塔に観測装置を取り付けて定点観測を行っ



図 3 国道 39 号線上にある大雪山系石北峠の位置。石北峠頂上の標高は 1050 m である。



図 4 観測地点の航空写真。観測機器は白丸で示す石北峠北見方面の 7 台目の鉄塔に設置した。



図 5 観測機器の設置状況と装置拡大写真。観測機器は視程計が設置された道路管理用の鉄塔に取り付けた。

た。図 5 に測定機器の設置状況を示す。

4.2 実験概要

石北峠での定点観測に際し、チャンネルごとに独立していた 6 V と 18 H の MMRS2 および CCD カメラと IT-550L を全て一体化した改良版の MMRS2 を使用した。これにより 1 台のノートパソコンで全センサーのデータを記録できるようになった。ノートパソコンは低温対策のため断熱ボックスに納め、鉄塔に設置した。断熱ボックス内部の温度はノートパソコン自身の発熱によって常に動作可能温度に保たれていた。これら観測装置の電力は鉄塔の配電盤より供給された。改良版 MMRS2 ではアンテナ受信口を発泡スチロールで覆い断熱すると共に着雪・着氷を防ぐ工夫をした。発泡スチロールはマイクロ波を非常によく透過するため、受信口を覆っても受信するマイク

ロ波に影響はほとんどない。表 1 に改良版 MMRS2 の機能・性能を、図 5 右上に改良版 MMRS2 の写真を示す。本研究ではこれらの屋外観測機器の全体および 7 章で述べる路面状態判別アルゴリズムを路面状態自動判別システムと呼ぶこととする。

路面状態自動判別システムは鉄塔の 3 m 高の位置に設置したため、車両通過に伴う雪の巻き上がりなどでアンテナ受信口に着雪することはなかったことが CCD カメラ画像から推察された。図 5 の路面上の丸印は装置の観測視野を示している。路面状態自動判別システムは北見工業大学構内実験時と同様に路面に対して入射角度 45 度で設置した。6 V と 18 H の観測視野角はそれぞれ 19 度と 18 度であり、路面上のフットプリントサイズは直径約 2 m の円で北見側から石北峠頂上へ上る途中の登坂車線上に設定した。路面状態自動判別システムでは 6 V と 18 H の観測時間を 300 msec、IT-550L の観測時間を 200 msec で設定した。観測は 5 分間隔で、1 回のデータ取得につき 5 秒間の 6 V、18 H、IR の連続した値 15 個と 5 枚の CCD カメラ静止画像を記録した。路面観測視野内を車両が通過すると路面のデータが取得できなくなるが、5 秒連続して取得することでそのなかから有効なデータを選ぶことができ、路面のデータを必ず取得することができた。観測期間は 2008 年 11 月 28 日から 2009 年 5 月 15 日までであり、5 分に 1 回 5 秒間を 1 セットとして 48113 セットを欠測なく継続して取得できた。

4.3 目視路面状態判別

図 6 は路面状態自動判別システムの CCD カメラの画像例である。図 6 中の円は 6 V と 18 H の路面上のフットプリントサイズに相当している。円で囲まれた範囲について、目視判別によって 4 種類（乾燥、湿潤、凍結、圧雪）の路面状態の混在割合を評価した。図 6 左上が乾燥路面、右上が湿潤路面、左下が凍結路面、右下が圧雪路面である。路面状態の判別には、路面の色と路面温度に着目して判別した。路面の色が白いときは圧雪路面、灰色のとき乾燥路面とし、色が乾燥路面よりも黒く、IR が 273 K より高いとき湿潤路面とした。湿潤路面同様に路面の色が黒くても IR が 273 K 以下のときは凍結路面と判断した。

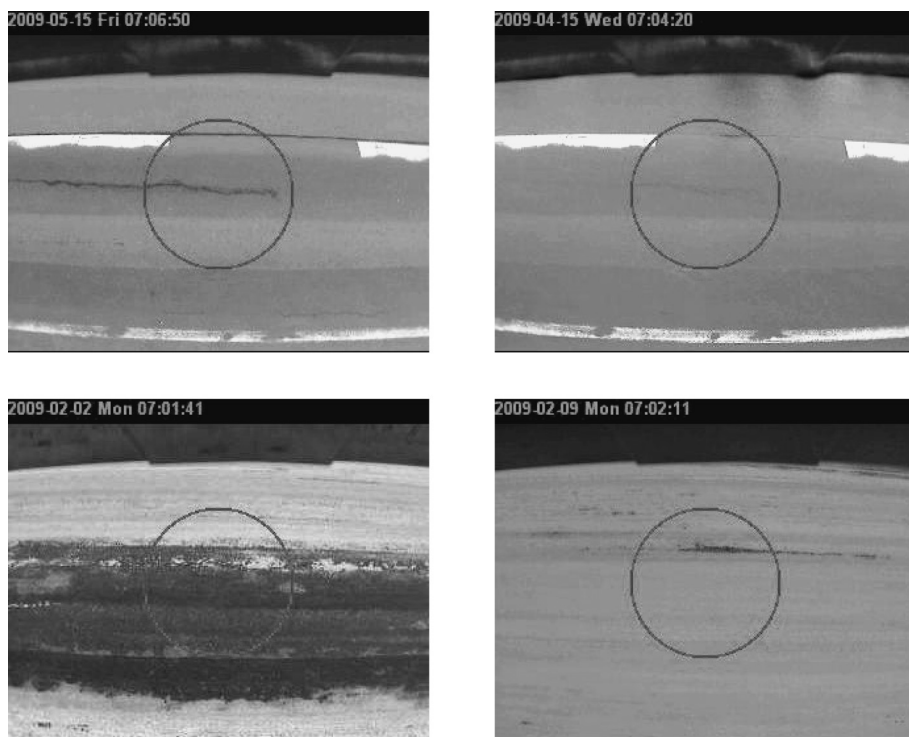


図 6 路面状態判別に使用したカメラ画像。円内部を計測する。左上が乾燥路面，右上が湿潤路面，左下が凍結路面，右下が圧雪路面。

図 6 では比較的判別が容易なものを例として示したが、実際には路面状態がもっと複雑に混ざり合っており、画像を拡大して細かい部分まで判別を行った。また、夜間の路面判別は街灯が近くにあったため、路面を見ることができ色がコントラストが低く、乾燥路面と湿潤路面あるいは凍結路面の判別が非常に困難であった。このような場合は、判別しやすい前後の昼間画像と比較して急激な色の変化がなければ路面状態が一定であると判断した。

4.4 路面状態変化に伴う輝度温度変化

図 7 は目視と IR から判別した路面状態割合と TB_{6V} , TB_{18H} , IR の時間変化を示す。横軸に日時、左縦軸に路面状態の被覆割合、右縦軸に TB および IR を示した。

図 7 の (a) および (b) に観測全期間の路面状態の被覆割合とそのときの TB を示した。この図より路面状態とその被覆割合さらには IR によって TB が異なることがわかる。 IR は 12 月中旬まで昼間に 273 K (0°C) を超えることがあり、路面

は凍結・融解を繰り返していた。3 月上旬まで最高気温は 0°C 以下で圧雪路面が頻出した。3 月中旬から 4 月中旬までは IR は昼間に 0°C 以上まで上昇し融解と蒸発、夜間は 0°C 以下となり凍結を繰り返し、徐々に乾燥していった。4 月中旬以降、路面状態は乾燥あるいは降雨による湿潤状態が断続的に現れた。4 月 27 日大雪があり一時的に圧雪路面となるがすぐに解けて乾燥した。

TB は湿潤路面では他の路面状態に比べ顕著に低い値を示しており、湿潤路面の判別は容易であることが示唆される。乾燥路面では IR が大きく日変化し、 TB は IR の変化と同調した変化をする特徴が見られた。凍結路面と圧雪路面では TB_{6V} の差はほとんど見られないが、圧雪路面では TB_{18H} が高い値を示す傾向が見られた。

図 8 は図 7 に (1)–(5) でマークした各路面の代表例および路面の変化が顕著な時のものを示した。図 8 の (1) は 5 月 7 日の乾燥路面の変化を表している。この図から昼間に IR が上昇して夜間に下降、それに同調して TB が上昇・下降している様

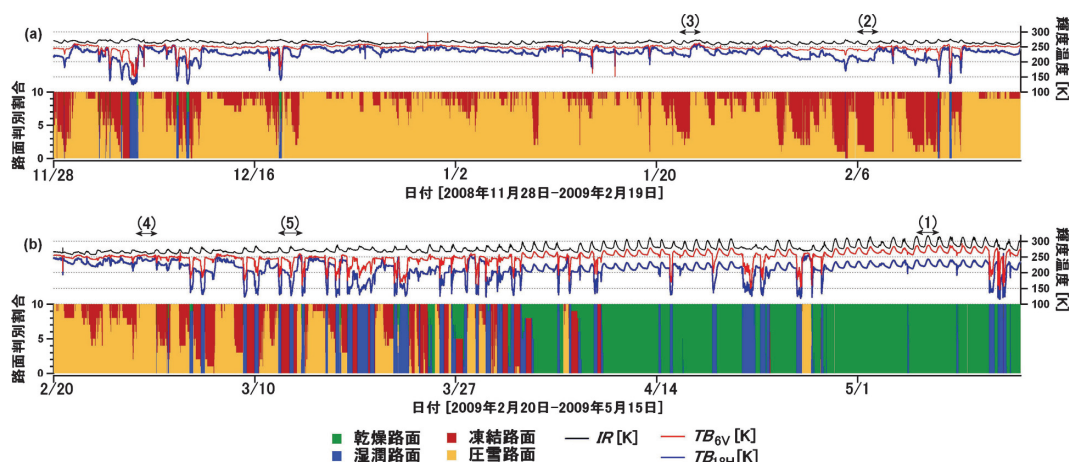


図 7 2008 年 11 月 28 日から 2009 年 5 月 11 日までの CCD カメラから判別した路面状態の割合とマイクロ波輝度温度 TB_{6V} , TB_{18H} と路面温度 IR の変化。

(a) 2008 年 11 月 28 日から 2009 年 2 月 19 日まで

(b) 2009 年 2 月 20 日から 5 月 11 日まで

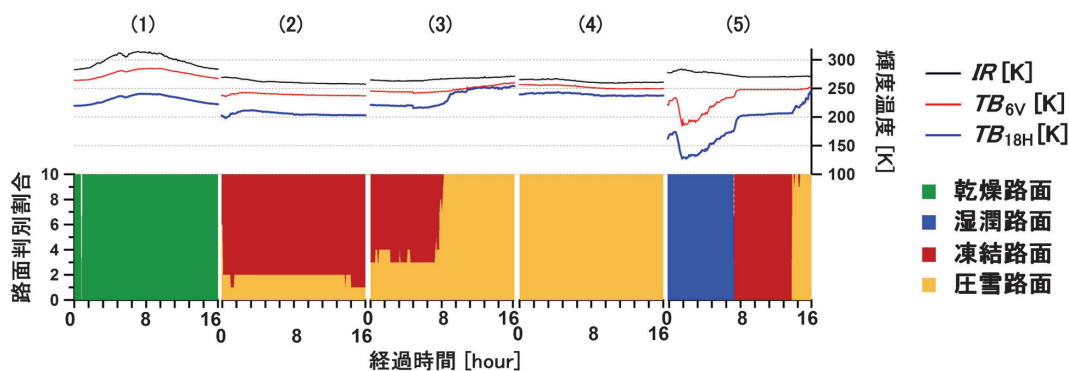


図 8 図 7 で示した (1) から (5) までの典型的な路面状態におけるマイクロ波輝度温度 TB_{6V} , TB_{18H} と路面温度 IR の変化。

(1) 乾燥路面, (2) 凍結路面, (3) 凍結路面～圧雪路面, (4) 圧雪路面, (5) 湿潤路面～凍結路面。

子がわかる。これは乾燥路面の状態が一定であるため、放射率が変化せず IR の上昇・下降に伴い TB も上昇・下降したと考えられる。(2)は2月6日の凍結路面の変化である。凍結路面は IR が高いとき放射率が変動し、 TB は IR と逆の挙動を示していた。これは凍結路面が完全に凍結しておらず水分を含んでいるためだと考えられる。 IR が十分に低くなり完全に凍結すると放射率が一定になり IR に同調した TB の変化を示した。(3)は1月22日から23日にかけて凍結路面上に雪が降り積もり、圧雪路面へ変化していくときの変化である。降雪があるとき、 TB_{18H} が大きく上昇する

のに比べ TB_{6V} はほとんど変化していない。これは18Hの波長が長く水平偏波であるため透過が少なく表面の影響を受けているが、6Vは比較的波長が長く垂直偏波であるため透過しやすく表層の影響を受けにくいためであると考えられる。その後積雪の圧密が進行することでマイクロ波が透過しにくくなり、6Vも影響を受け TB が徐々に増加した。(4)は2月28日の圧雪路面の TB 及び IR である。圧雪路面は、北見工業大学構内の実験結果と同様に、他の路面状態と比較して最も高い TB を示すことがわかった。十分に締め固まった圧雪路面は状態が安定しているため、放射率が一

定であり IR の変化に伴って TB も変化した。(5) は 3 月 13 日の昼から夜にかけて、湿潤路面の IR が低下して凍結路面へ変化する様子である。 IR が徐々に低下し 273K を下回るころ、急激な TB の変化が見られた。これは水から氷へ相変化したことで放射率が急激に上昇したためと考えられる。

5. 各路面状態の輝度温度範囲

第 3 章で述べた目視と IR で判別した路面状態の割合を、 TB による自動判別結果との比較を簡素化するために、混合路面状態を代表的な路面に単一化した。例えば凍結と圧雪の混合路面は、図 6 左下の写真のように轍は黒く、その間は白といった混在状態になっているが、この例では目視から凍結路面 80%、圧雪路面 20% と判別し、凍結路面が卓越していたため代表的な路面状態を凍結路面とした。また、凍結路面と圧雪路面が 50% ずつとなった場合、圧雪路面より凍結路面のすべり摩擦係数が小さいことから、凍結路面がより危険な路面状態であると判別されるため、この場合の路面状態を凍結路面とした。このように路面状態が混在する場合は、卓越する路面あるいは同程度の割合ではより危険な路面で代表し、 TB と比較した。危険性の順位はすべり摩擦係数(木下, 1988)を基準に 1. 凍結路面 > 2. 圧雪路面 > 3. 湿潤路面 > 4. 乾燥路面とした。

図 9 は石北峠路面観測実験から得られた各路面

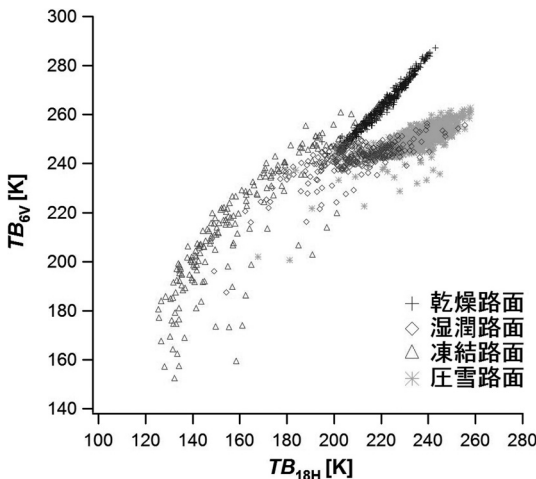


図 9 各路面状態の輝度温度 TB_{6V} , TB_{18H} の関係。

状態の TB を散布図にプロットしたものである。縦軸に TB_{6V} 、横軸に TB_{18H} をとった。この図より、図 2 に示した北見工業大学構内の実験結果と同様に、路面状態ごとに TB 分布がまとまった集合を形成していることがわかった。

それぞれの路面状態の TB 範囲は、湿潤路面では TB_{6V} が 160–260 K, TB_{18H} が 120–200 K と範囲が広く比較的低い値を示した。圧雪路面では TB_{6V} が 240–270 K, TB_{18H} が 230–260 K で比較的高い値となった。凍結路面では TB_{6V} が 220–260 K, TB_{18H} が 170–250 K と TB_{18H} の範囲が広い。乾燥路面では TB_{6V} が 240–290 K 程度, TB_{18H} が 190–250 K 程度で、路面状態が安定しており放射率が一定になるためほぼ直線で表せる。

湿潤路面の放射率は非常に低いため、他より非常に低い TB を示しかつ少ない水分で大きく反応するため、非常に広い範囲の TB 分布を示した。凍結路面も広い範囲の TB 分布を示すが、これは湿潤路面と凍結路面の境界を 273 K としたため、凍結し始めの状態である湿潤路面と凍結路面の混在状態を凍結路面に含め、また凍結路面と圧雪路面の混在状態で 5 対 5 を凍結路面としているためである。また、凍結路面の厚さの違いによっても放射率は変化するため、これによっても TB が示す範囲が広がる。図 8 の散布図より、 TB の相関から路面状態の判別をすることが可能であるように見えるが、一部分布範囲の重なる部分があり、この重複部分の分離は難しい。そこで、判別基準に IR を付加した手法を検討した。

6. 路面状態の時間変化情報の利用

図 10 の (a) は TB の 2 チャンネルと IR の 3 要素による散布図である。縦軸に IR 、横軸は TB であり手前から左奥へ増加する軸が TB_{6V} で、手前から右奥へ増加する軸が TB_{18H} である。同一路面状態である場合でも IR によって TB のとりうる範囲が異なる。特に乾燥路面は放射率が一定であるため、 IR に比例した TB 分布を形成している。図 10 の (b) は縦軸に IR 、横軸に TB_{6V} をとった散布図である。 IR によって TB の分布が異なり、路面状態毎の TB 分布の境界が TB だけの図 9 よりもはっきりとしている。特に凍結路面と圧雪路面の境界がより明確になった。図 10 の (c)

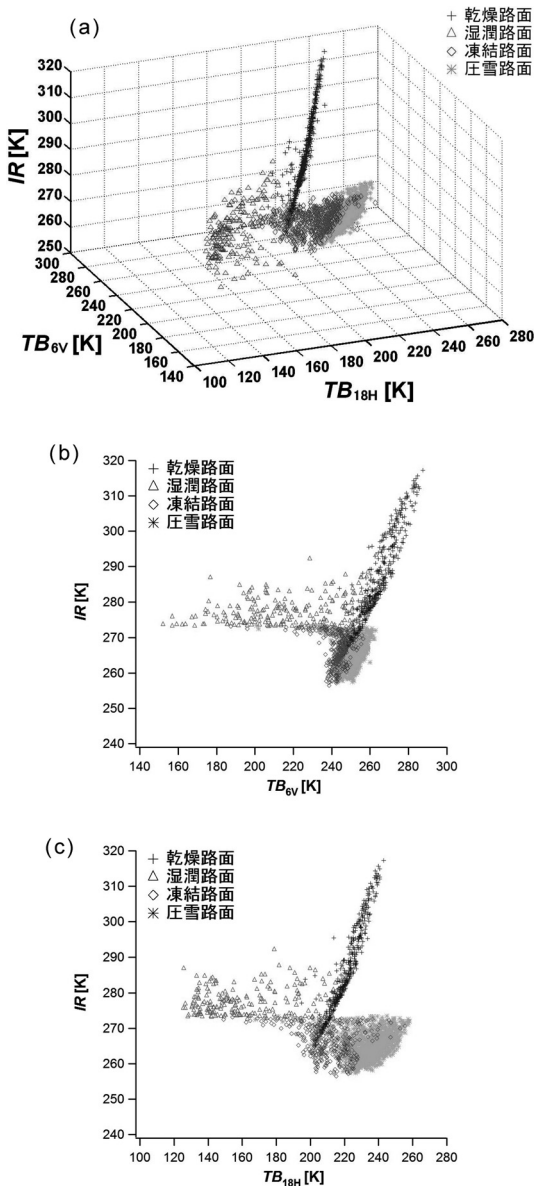


図 10 各路面状態の輝度温度 TB_{6V} 、 TB_{18H} と路面温度 IR の関係。a) 輝度温度 2ch と IR 、b) TB_{6V} と IR 、c) TB_{18H} と IR 。 IR によって輝度温度の分布が異なることがわかる。

は縦軸に IR 、横軸に TB_{18H} をとった散布図である。図 10 の (b) と同様に凍結路面と圧雪路面の境界がはっきりしており、路面判別がより精度よく判別できる。しかし、 IR が低いときの乾燥路面の TB は凍結路面の TB 分布に重なってしまうため判別ができない。

ここで、凍結路面の形成過程を考えると、凍結

路面は湿潤路面から遷移するのであって、乾燥路面が短時間で凍結路面になることはないと考えられる。そこで、低温の乾燥路面と凍結路面の判別条件に時間経過による路面状態の遷移条件を加えることで判別が可能と考えた。本研究で設定した遷移条件は、乾燥路面から凍結路面へ短時間で遷移しない。逆に凍結路面から乾燥路面にも短時間で遷移しないと、乾燥路面と凍結路面の間には必ず湿潤路面を経由して遷移すると設定した。

以上より、次章で述べる路面状態自動判別システムの路面自動判別アルゴリズムは、 TB の 2 チャンネルと IR に加えて、時間経過による路面状態の変化を合わせた計 4 要素を採用して行った。

7. 路面状態自動判別の方法

図 11 は路面状態自動判別システムにおける路面状態の自動判別方法をフローチャートで表したものである。最初 ($t=1$) の路面状態判別は TB_{18H} 、 TB_{6V} 、 IR の 3 要素で行う。判別方法は、3 要素の特徴空間において、得られたデータと各路面の 3 要素の平均値までの距離で最も短い距離を示した路面状態に判別した。ここで用いた距離とはマハラノビス距離である。マハラノビス距離は、統計分類などの多変量解析に用いられ、あるサンプルと既知のサンプルとの類似性を定量的に評価できる尺度である。一般的な距離とは異なり、分布を考慮し重みを付加した距離であり、式 (2) で与えられる。

$$D_i = ((X - \mu_i)' \cdot \Sigma_i^{-1} (X - \mu_i))^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 D_i はマハラノビス距離、 X は得られたデータ、 μ_i は平均値、 Σ_i は共分散行列である。各路面それぞれに一つのマハラノビス距離が与えられるため、添字 i は各路面を表している。' は転置を表し、上付き -1 は逆行列を表す。

判別基準である各路面状態の平均値 μ_i と共分散行列 Σ_i は石北峠の 2 時間毎のデータから算出した。各路面に対し D_i を求め、この値が最も小さい値を示す路面状態と判別した。

湿潤路面と凍結路面は IR (凝固点、融点) を考慮して D_i を補正した。2 回目以降の路面状態判別

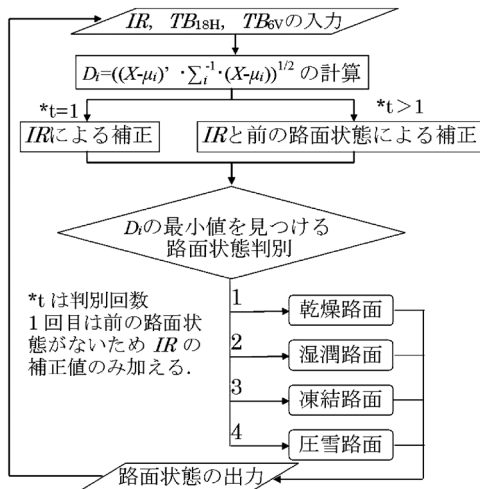


図 11 路面状態自動判別のフローチャート.

には IR の補正に加え, 路面状態の変化過程を考慮し, 取得データから算出した D_i を補正した. 補正の具体例を挙げると, 前回 (5 分前) の路面状態が乾燥路面であるとき第 6 章で述べた遷移条件から凍結路面や圧雪路面と判断しないため凍結・圧雪路面からの D_i を増加させる. D_i を増加させたことで低温の乾燥路面とすることができる.

8. 目視路面判別と路面自動判別の比較

目視路面判別と 7 章で述べた路面状態自動判別

の比較を行った. ここで, 路面自動判別の精度を正確に検証するために, 以下の二つの条件を設け比較するデータを抽出した. 最初の条件は, 降雪中あるいは降雪直後の路面状態は積雪の下層路面を判別できないため除くこととした. 二つ目の条件は, 目視による被覆割合は定量的には不確かさがあるため, その割合が十分に信頼できる全面一様なデータを使用することとした. なお 5 章で述べたように混在路面において, 卓越した種類や同程度の割合であるならばより危険な種類を選択してその単一路面としたデータも抽出対象とした. 抽出されたデータのサンプル数は 25191 データとなり, データ全体の 52% に留まった. 路面状態別では, 乾燥 9615, 湿潤 3715, 凍結 1693, 圧雪 10168 となった. 抽出できなかった降雪中および混在路面のデータは 48% に達し, 今後は各路面の混在比率に対応したマイクロ波放射モデルの構築が必要である.

表 2 に結果として, 混在路面を含まない単一路面において目視判別した各分類を自動判別がどの路面状態と判定したかの割合を示す. 目視判別と自動判別の一致率は, 乾燥路面で 99.7%, 湿潤路面で 96.4%, 凍結路面で 94.0%, 圧雪路面で 93.5% を示した. いずれの路面状態でも一致率は 90% を超え, 全体の一致率は 96.4%, 不一致率は

表 2 目視判別した各分類を自動判別がどの路面状態と判定したかの割合

		目 視 判 別 に よ る 各 路 面 分 類				
		乾 燥	湿 潤	凍 結	圧 雪	
自動判別による路面状態の判定	乾 燥 (データ数)	99.7% (9586)	3.1% (115)	0.2% (3)	0.0% (0)	
	湿 潤 (データ数)	0.3% (29)	96.4% (3581)	5.8% (98)	0.1% (10)	
	凍 結 (データ数)	0.0% (0)	0.5% (19)	94.0% (1592)	6.3% (641)	
	圧 雪 (データ数)	0.0% (0)	0.0% (0)	0.0% (0)	93.6% (9517)	
	計 (データ数)	100.0% (9615)	100.0% (3715)	100.0% (1693)	100.0% (10168)	
一 致 (データ数)		99.7% (9586)	96.4% (3581)	94.0% (1592)	93.6% (9517)	平均値 (データの 総数： 25191)
不 一 致 (データ数)		0.3% (29)	3.6% (134)	6.0% (101)	6.4% (651)	3.6% (915)

3.6%と良好な結果が得られた。

危険な凍結路面と圧雪路面で不一致だったケースを検証すると、両路面の全データ数 11861 中、凍結路面を安全な乾燥路面や湿潤路面と誤判別したケースは 101 件で、同様に圧雪路面を誤判別したケースは 10 件であり、危険な不一致率は 0.9%であった。これは大きな割合ではないが、滑りやすく危険な路面状態を安全な路面状態と誤判別することは非常に危険なことなので無視できない。目視で凍結と判断された路面をマイクロ波で誤判断するケースは、湿潤と誤判断することがほとんどであった (98 件)。マイクロ波では観測物質の表面状態、層内部の状態やその厚さなどにより値が決定する。マイクロ波放射計は目視では検知できない変化 (特に凍結・融解時の水分の有無) でも捉えることができるため、目視判別では凍結路面とした路面状態でもマイクロ波の自動路判別では湿潤路面と判別されたと考えられる。このような凍結路面上の水膜の存在は最も危険な路面状態の 1 つであり、今後新たなカテゴリーとして追加して分離することが課題である。目視で圧雪と判断された路面をマイクロ波で誤判断するケースは、凍結と誤判断することがほとんどであった (641 件)。圧雪路面は車両の通過により融解・凍結を繰り返して表層が凍結する。このような場合、目視では圧雪路面と見えている路面状態でも自動判別では凍結路面と判別されたと考えられる。また、目視では凍結路面に降雪した場合は圧雪路面としているが、この場合マイクロ波は積雪を透過して下層の凍結路面の影響を強く反映する。このケースも最も危険な路面状態の 1 つであり、凍結路面上の水膜に加えて新たな分類方法を検討することが今後の課題である。

以上のように目視とマイクロ波放射計では検知している深さに差がある。そのため両者の判別に不一致が生じたと考えられる。一方でマイクロ波放射計は、水膜や積雪で覆われた凍結路面、圧雪路面の表面凍結など目視で判別することが困難な危険な路面状態を検知できる可能性を示していると考えられる。

9. まとめ

本研究ではマイクロ波放射計の 6 GHz 垂直偏

波 (6 V) と 18 GHz 水平偏波 (18 H)、および赤外放射温度計 (IR) を用いて北見工業大学構内と石北峠の冬期路面の観測を行い、路面状態自動判別システムの開発と精度の検証を行った。観測結果から、異常なデータや故障が見られず、本研究で使用了装置の冬期耐寒性は十分あることが証明された。各路面状態における 6 V と 18 H の輝度温度 (TB_{6V} , TB_{18H}) ならびに IR の特徴を解析し、路面状態の自動判別法を開発した。 TB_{6V} , TB_{18H} の特徴空間におけるマハラノビス距離からどの路面分類に最も近いかに判別した。遷移条件と IR からマハラノビス距離に補正を加え、自動判別の精度を向上させた。

混在路面を含まない単一路面において、目視による路面判別と自動路面判別の一致率は、乾燥路面で 99.7%、湿潤路面で 96.4%、凍結路面で 94.0%、圧雪路面で 93.5% を示し、全体の一致率は 96.4% であった。危険な凍結路面と圧雪路面における不一致率は 0.9% であった。目視で凍結や圧雪と判断された路面において、マイクロ波放射計でそれぞれを湿潤、凍結と判断し目視と不一致を示したケースがほとんどであった。この不一致は、マイクロ波放射計が目視で判別できない凍結路面上の水膜や積雪、圧雪路面の表面凍結を検知していることを示唆しており、今後これらの新しいカテゴリーを加えることで、より多彩な冬季路面を判別できる手法の改良が課題と思われる。一方で、一致率の検討に使用できなかった降雪中および混在路面のデータは 48% にも達しており、今後は各路面の混在比率に対応したマイクロ波放射モデルを構築するなど、全路面に対応した手法の開発が必要である。将来的には連続路面すべり抵抗値測定装置 (CFT: Continuous Friction Tester) による雪氷路面のすべり抵抗値 (HFN: Halliday Friction Number) (徳永ら, 2009) とマイクロ波データを比較することで、定量的に冬期路面の危険度評価を行いたい。最後に、本研究で使用了マイクロ波放射計のフットプリントは約 2 m の直径の円であり、実際に車両のタイヤが走行しない部分を多く含んでしまっている。路面の判別精度を向上させるためには、観測視野角の縮小といったハードウェア面の技術的改良も課題である。

謝 辞

観測装置の設置や冬期路面の観測でご協力を頂いた北海道開発局網走開発建設部北見道路事務所職員の各位に感謝を表します。また、本研究を行う上でご助力・ご助言を頂いた寒地土木研究所交通チームの各位に感謝を表します。

文 献

古濱洋治・岡本謙一・増子治信, 1986: 人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング, (社)電子情報通信学会, p. 275.
北海道開発局, 1997: 冬期路面管理マニュアル, 北海道開発局, 1-50.
本間幸造・稲垣敏治, 2006: 画像型分光偏光放射計による路面凍結モニタリングシステム, 宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部・航空プログラムグループ公開研究発表会前刷集, 104-107.

加治屋安彦, 2006: 雪みちに挑む新技術～安全・快適北の道～, 2005 年度北海道開発土木研究所月報特集号, 42-54.
加治屋安彦・松田泰明・松島哲郎・山際祐司・正岡久明・星野 洋, 2006: 冬期道路情報が道路利用者の行動変化に与える影響に関する研究, 第 5 回 ITS シンポジウム 2006, 6.
木下誠一, 1988: 雪と氷のはなし, 技報堂出版株式会社, 140-147.
村田藤麿・吉田健一・上原麻子, 2006: 画像情報を活用した路面判別技術に関する基礎研究, 第 18 回ふゆトピア研究発表会論文集, 6.
日本リモートセンシング研究会, 1992: 図解リモートセンシング, 社団法人日本測量協会, 1-93.
高橋尚人・徳永ロベルト・浅野基樹・石川信敬, 2007: 冬期路面管理支援システムの構築と運用, 寒地土木研究所月報, No. 652, 8-17.
徳永ロベルト・高橋尚人・浅野基樹, 2009: 路面のすべり抵抗値を用いた冬期道路の性能評価手法の開発について, 北海道の雪氷, No. 28, 97-100.

Development of automatic detection system of road freezing conditions using microwave radiometer

Naoki WATANABE^{1)*}, Hiroyuki ENOMOTO^{1)**}, Kazutaka TATEYAMA¹⁾, Akito YAMAMOTO²⁾,
Kiyotaka TANAKA²⁾, Shuhei TAKAHASHI¹⁾, Akiko IWAMOTO²⁾, Ryosuke SASAKI¹⁾
and Alimasi NUERASIMUGULI¹⁾

1) Kitami Institute of Technology,

165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido, 090-8507

2) Mitsubishi Electric TOKKI Systems Corporation,

730-11, Kamimachiya, Kamakura, Kanagawa, 247-0065

* Present affiliation: Soken Co. Ltd.,

7-3 S7W4, Abashiri, Hokkaido, 093-0017

** Present affiliation: National Institute of Polar Research,

10-3, Midori-cho, Tachikawa, Tokyo, 190-8518

Abstract: Winter road conditions pose a serious problem to the traffic in the cold regions. We developed a new system to detect freezing as well as snow cover on roads. This system determines road conditions by measuring the microwave radiation emitted by a road and surface road temperature. The system also checks for the changes in the road microwave/surface temperature pattern and in possible road conditions. The standard range of microwave radiation for various road conditions was obtained for the experimental road surface. The proposed system was installed at the Sekihoku Pass in the Taisetsu Mountains, and it monitored the winter road conditions for one complete winter season. The data obtained by the system at the Sekihoku Pass was used to define standard ranges to distinguish between various road conditions. The accuracy of the sensor and the analyzing system in detecting the correct road conditions for an uniform road condition was more than 90%.

(2011 年 2 月 1 日受付, 2011 年 4 月 24 日改稿受付, 2011 年 6 月 15 日最終改稿受付,
2011 年 6 月 15 日受理, 討論期限 2012 年 1 月 15 日)