

近赤外線およびマイクロ波を用いた 路面状態の評価について

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム ○中島 知幸
高橋 尚人
国立大学法人北見工業大学 工学部 社会環境工学科 館山 一孝

本研究では、道路交通の支障とならず、雪氷路面の状態を評価可能な雪氷路面センシング技術の開発を目的に、平成27年度の夏期および冬期に、近赤外線およびマイクロ波を使用した野外試験を実施した。本報告では、野外試験の方法と取得データを紹介するとともに、雪氷路面の状態を評価する手法について検討した。

キーワード：冬期路面管理、路面状態判別、近赤外線、マイクロ波

1. はじめに

積雪寒冷地における基本的な凍結路面对策として、凍結防止剤が散布されているが、維持管理コストの縮減等の観点から、散布の一層の効率化が必要である。冬期路面管理マニュアル(案)では、「散布は、気象条件、路面条件等により適切な散布剤(材)、散布手法等を選定し、(中略)最小限の散布量で効果的な利用を図る」としている¹⁾。道路管理者は道路巡回、気象データの活用に取り組んでいるが、路面上の雪氷量を計測する実用的な技術がないため、散布の判断や散布量調整は、オペレータの経験に基づいて実施されている。

本研究では、道路交通の支障とならず路面状態を評価可能な方法として、近年、研究が進められている光学式センサーを用いた路面状態の評価に取り組む。本稿では、平成27年度に実施した、近赤外線およびマイクロ波を使用した野外試験について報告する。

2. 光学式センサーに関する既往研究

路面状態の評価に用いられる光波等は、①可視光(おおそ380nm~780nm)、②近赤外線(おおそ780nm~2500nm)および③マイクロ波(1mm~1m程度)に分類される。

① 可視光を用いた路面状態評価に関する研究

村田ら²⁾はCCTVカメラ画像の輝度やエントロピーの範囲等を解析して路面状態を判別する技術開発に取り組んだ。CCTVカメラ画像を用いるので装置を低コストで用意できるが、可視光であるため、道路照明がある地点でしか夜間の路面判別ができない。Alimasi³⁾らは可視光源の反射光を解析し路面状態を

判別する技術開発に取り組んだ。周辺光の干渉を受けないよう覆いを必要とし、受光部を路面に近づける必要があるため受光部が汚れやすい。

② 近赤外線を用いた路面状態評価に関する研究

水や氷が特定波長の近赤外線を吸収する性質を用いて路面状態判別する研究が進められている(Jonssonら⁴⁾、堤ら⁵⁾、Casselgrenら⁶⁾)。太陽光の影響を補正することが必要になるが、装置は低コストである。

③ マイクロ波を用いた路面状態評価に関する研究

地球の水環境の衛星観測などに用いられてきた。路面判断では、渡邊ら⁷⁾、高橋ら⁸⁾がマイクロ波の輝度温度と放射率を用いた路面判断技術の開発に取り組んできた。マイクロ波放射計は高価だが、太陽光の影響を受けない。

以上より、技術の汎用性・実用性に優る近赤外線およびマイクロ波を対象として検討を行った。

3. 路面計測試験

3.1 試験概要

本試験は、2015年8月31日~2015年9月2日の夏期3日間と2016年2月7日~2016年2月8日の冬期2日間、北見工業大学第1総合研究棟屋上で実施した。近赤外線およびマイクロ波を使用して、同条件で計測を実施した。

近赤外線およびマイクロ波を用いた計測システムをそれぞれ写真1および写真2に示す。測定対象の舗装路面として40cm×40cmの密粒度アスファルト舗装供試体を使用し、反射光の強度測定には可視赤外分光放射計およびマイクロ波放射計を使用した。また、近赤外線の計測では、特定角度で光を照射および受光するための角度調

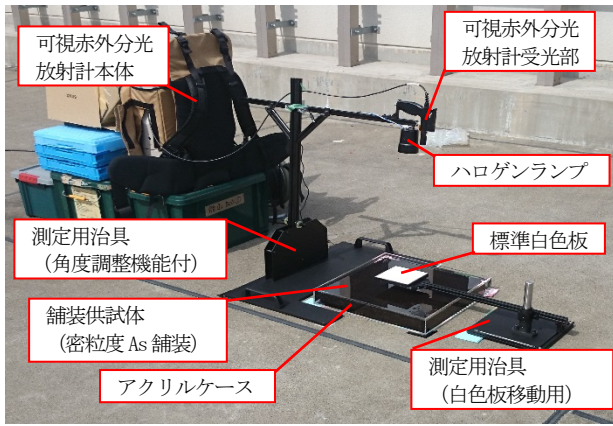


写真1 計測システム (近赤外線)

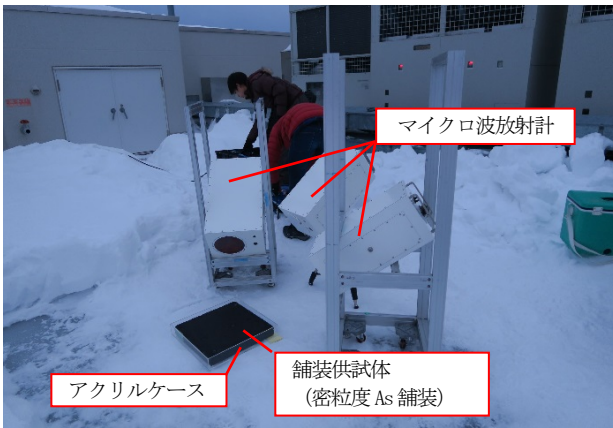


写真2 計測システム (マイクロ波)



写真3 膜厚計 (左: NASA 水膜厚計、右: 塗膜厚計)

表1 放射計仕様

装置名	使用波長
可視赤外分光放射計	350nm～2500nm
マイクロ波放射計	6GHz、18GHz、36GHz(冬期のみ使用)

整機能付きの測定用治具を使用し、光源はハロゲンランプ (50W) を使用した。水膜厚および氷膜厚の計測には、NASA 水膜厚計 (写真3: 左) および塗膜厚計 (写真3: 右) を使用した。可視赤外分光放射計とマイクロ波放射計の仕様を表1に示す。

3.2 夏期試験 (乾燥路面と湿潤路面)

夏期試験では、乾燥および湿潤路面の計測を昼間

表2 計測条件 (夏期試験)

日時	2015年8月31日 19:30～2015年9月2日 11:30
場所	北見工業大学 第1総合研究棟屋上
天候	晴れ時々曇り
路面状態	乾燥、湿潤 (純水、濃度3.5%NaCl水溶液、濃度8.0%NaCl水溶液)
計測対象路面	密粒度アスファルト舗装供試体
水膜厚	0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm
近赤外線	光源 ハロゲンランプ (50W)
	照射角度 (水平から)45°、55°、65°、75°、85°
	受光角度 照射角度と同じ
マイクロ波	周波数 6GHz、18GHz
	受光角度 (水平から)35°

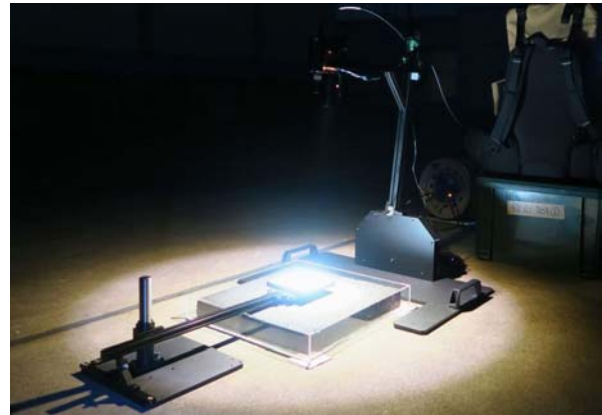


写真4 夏期試験状況 (近赤外線、夜間)



写真5 夏期試験状況 (マイクロ波、昼間)

および夜間に実施した。試験条件を表2に、近赤外線およびマイクロ波を用いた試験の状況をそれぞれ写真4および写真5に示す。湿潤路面の作製には純水、濃度3.5%NaCl水溶液および濃度8.0%NaCl水溶液を使用し、水膜厚を維持するために、アクリルケース内に舗装供試体を設置し、純水を順次追加した。また、計測条件を合わせるために、乾燥路面の計測でもアクリルケース内に舗装供試体を設置した。

近赤外線による試験手順について述べる。

- i) 85°の角度に光源および可視赤外分光放射計受光部を設置し、舗装供試体からの反射光を計測する。
- ii) 供試体上に白色板を設置し、反射光を計測する。
- iii) i)、ii)を75°、65°、55°および45°で計測する。
- iv) 湿潤路面 (純水、濃度3.5%および8.0%NaCl水溶

液)の水膜厚 0.5mm、1.0mm、1.5mm および 2.0mm で計測する。

次に、マイクロ波による試験手順について述べる。

- i) 6GHz、18GHzのマイクロ波放射計を設置し、舗装供試体を観測する。
- ii) 湿潤路面（純水、濃度 3.5%および 8.0%NaCl 水溶液）の水膜厚 0.5mm、1.0mm、1.5mm および 2.0mm で観測を実施する。

3.3 冬期試験（乾燥路面および凍結路面）

冬期試験では、乾燥および凍結路面の計測を夜間に実施した。試験条件を表 3 に、近赤外線およびマイクロ波を用いた試験の状況を写真 6 および写真 7 に示す。

近赤外線による試験手順について述べる。

- i) 85° の角度に光源および可視赤外分光放射計受光部を設置し、舗装供試体からの反射光を計測する。
- ii) 供試体上に白色板を設置し、反射光を計測する。
- iii) i)から ii)を 75°、65°、55° および 45° で観測する。
- iv) 凍結路面（純水）の水膜厚 0.5mm、1.0mm、1.5mm および 2.0mm で計測する。

次に、マイクロ波による試験手順について述べる。

- i) 6GHz、18GHz および 36GHz のマイクロ波放射計を設置し、舗装供試体を観測する。
- ii) 凍結路面（純水）の水膜厚 0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm および 3.0mm で観測を実施する。

表 3 計測条件（冬期試験）

日時	2016年2月7日 17:50～2016年2月8日 20:00	
場所	北見工業大学 第1総合研究棟屋上	
天候	曇り時々雪	
路面状態	乾燥、凍結（純水）	
計測対象路面	密粒度アスファルト舗装供試体	
氷膜厚	0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm	
近赤外線	光源	ハロゲンランプ (50W)
	照射角度	(水平から)45°、55°、65°、75°、85°
	受光角度	照射角度と同じ
マイクロ波	周波数	6GHz、18GHz、36GHz
	受光角度	(水平から)35°



写真 6 冬期試験状況（近赤外線、夜間）



写真 7 冬期試験状況（マイクロ波、夜間）

4. 試験結果

4.1 近赤外線による乾燥路面の計測結果

夜間および昼間に計測した乾燥路面の結果を図 1 および図 2 に示す。横軸は波長、縦軸は反射率を示している。反射率は、可視赤外分光放射計で計測される、計測の基準となる標準白色板からの反射光に対する比率を示している。夜間の反射率は角度依存性が高く、角度が大きくなるにつれて大きくなる。また、各角度間で波形は類似している。一方、昼間の計測結果は、夜間の計測結果と波形の形状が異なる。この要因は、大気中の水分等により、地表付近では太陽光が殆ど存在しない 1400nm 付近において、夜間の計測結果と類似していることから、太陽光の影響と考えられる。

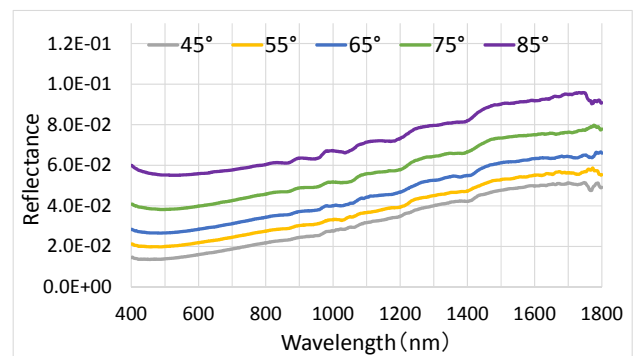


図 1 乾燥路面（夜間）計測結果

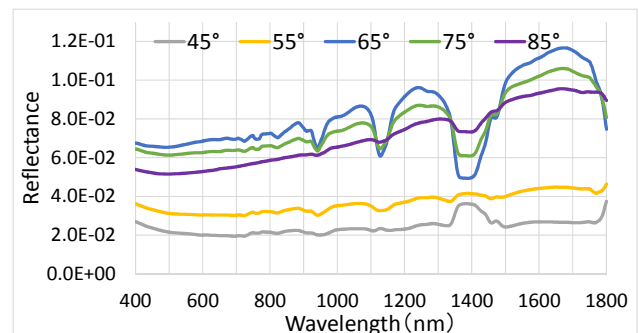


図 2 乾燥路面（昼間）計測結果

4.2 近赤外線による湿潤および凍結路面の計測結果

夜間に計測した湿潤および凍結路面の結果を図3に示す。湿潤および凍結路面では、乾燥路面と同様に角度依存性が高く、角度が大きくなるにつれて反射率が大きくなり、各角度間で波形は類似している。しかし、図1に示す乾燥路面の波形と、図3に示す湿潤および凍結路面の波形は、明らかに形状が異なる。また、湿潤路面と凍結路面の波形についても、山や谷といった極値の存在する波長や1400nm付近の吸光作用のある波長が異なり、波形の形状が異なる。

次に、夜間に75°で計測した湿潤および凍結路面の膜厚別の計測結果を図4および図5に示す。湿潤路面および凍結路面ともに、膜厚が異なる場合に、反射率が異なる波長が存在する。

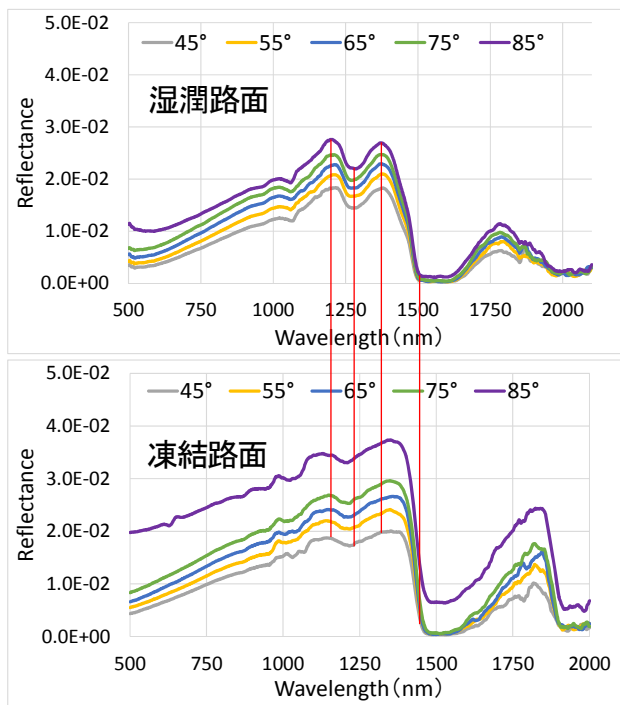


図3 湿潤および凍結路面(夜間、純水1.0mm)計測結果

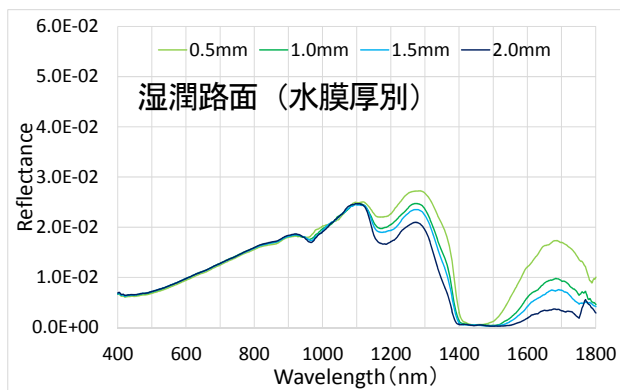


図4 湿潤路面(夜間、75°、純水)計測結果

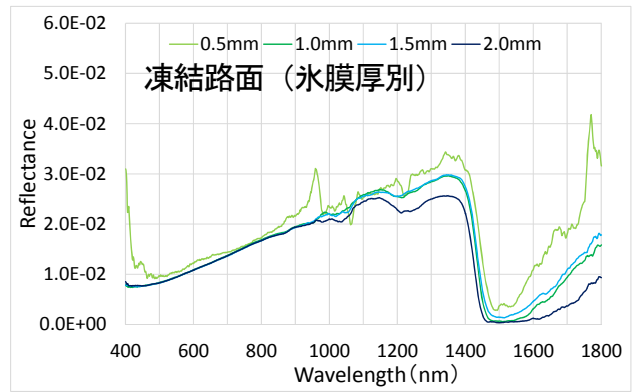


図5 凍結路面(夜間、75°、純水)計測結果

4.4 近赤外線による塩分濃度別湿潤路面の計測結果

夜間に75°で計測した純水、濃度3.5%NaCl水溶液および濃度8.0%NaCl水溶液を用いた湿潤路面(水膜厚1.0mm)の計測結果を図6に示す。塩分濃度が異なる場合に、反射率が異なる波長帯が存在することがわかる。この波長帯の一部(約1100nm以下)は、図4に示す水膜厚の違いを判別できる可能性のある波長帯と重複しないことから、4.2で述べた波形の形状による路面状態の判別に注意する必要があるが、塩分濃度についても判別できる可能性がある。

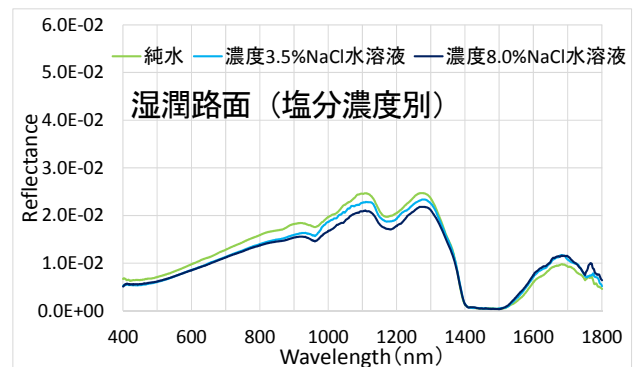


図6 湿潤路面(夜間、75°、水膜厚1.0mm)計測結果

4.3 マイクロ波による乾燥および湿潤路面の計測結果

マイクロ波を用いた乾燥および湿潤路面の計測結果を図7に示す。マイクロ波の周波数は6GHzと18GHzであり、Vは垂直偏波、Hは水平偏波を示している。横軸は水膜厚、縦軸は放射率を示す。放射率はマイクロ波放射計で計測できる輝度温度を、舗装供試体の温度で除したものであり、物体および状態固有の値を示す。図7から、水の有無により、放射率が大きく変化していることがわかる。また、水膜厚が増加すると、放射率は減少するが、水膜厚1.5mmでは、ほぼ増減なし、もしくは増加に転じている。

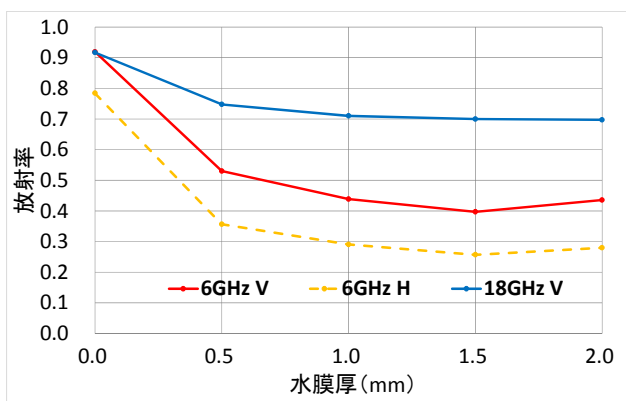


図7 湿潤路面(夜間、純水 1.0mm)計測結果

4.4 マイクロ波による乾燥および凍結路面の計測結果

マイクロ波を用いた乾燥および凍結路面の計測結果を図8に示す。マイクロ波の周波数は6GHz、18GHz および36GHz である。氷の有無により、6GHz、18GHz および36GHz の水平偏波(H)で放射率が変化している。また、氷膜厚が増加すると、垂直偏波(V)では殆ど変化がなく、18GHz および36GHz の水平偏波(H)の放射率は増加するが、36GHz の水平偏波(H)では氷膜厚 1.4mm で減少に転じている。このことから、垂直偏波よりも水平偏波の方が氷の識別に適していることがわかる。

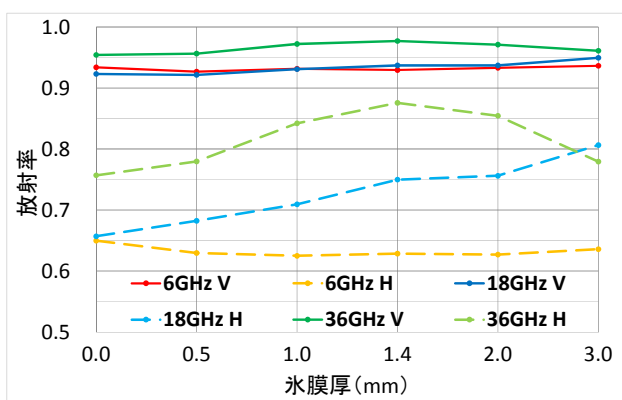


図8 凍結路面(夜間、純水 1.0mm)計測結果

5. まとめ

近赤外線およびマイクロ波を用いて、乾燥、湿潤および凍結路面を計測した。

近赤外線では、昼間の計測結果は太陽光の影響が大きく、補正方法の検討が必要になるため、まず夜間の計測結果を用いて検討を行った。夜間の計測結果では、乾燥、湿潤および凍結路面は、反射率-波長の波形の形状が異

なるため、形状の違いを判別できれば路面状態の判別が可能であると考えられる。湿潤路面および凍結路面においては、膜厚が変化すると反射率が変化する波長があることから、水膜厚および氷膜厚についても推定できる可能性がある。また、塩分濃度別の湿潤路面の計測結果から、塩分濃度が変化すると反射率が変化する波長があることから、塩分濃度についても推定できる可能性がある。

マイクロ波では、水および氷の有無による放射率の変化が確認できたことから、路面状態の判別が可能であると考えられる。また、水膜厚および氷膜厚が変化すると、放射率が変化する周波数があることから、水膜厚および氷膜厚についても推定できる可能性がある。

今後、圧雪路面の試験を実施し、今回得られたデータについて詳細な解析を進める予定である。

参考文献

- 1) 北海道開発局、1997：冬期路面管理マニュアル(案)
- 2) 村田藤麿、吉田 健一、上原麻子：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 回ゆきみらい研究発表会、2006.
- 3) Nuerasimuguli ALIMASI、高橋修平、日下稜、大久保雅文：光学式路面凍結検知システムの開発(4) - 2012 年陸別地域の路面観測-、北海道の雪氷、No.31(2012)、pp69-72、2012.
- 4) Patrik Jonsson、Torgeir Vaa、Felix Dobsław and Benny Thörnberg、Road condition imaging - model development、Transportation Research Board 94th Annual Meeting、2015.
- 5) 堤大祐、波通隆、堀武司、長尾信一、渡辺伸央、村上康之、磯田和志、池上貴志樹：近赤外光吸収画像による水・氷の検知に関する研究(第二報)、北海道立工業試験場報告 No.298、pp145-150、1999.
- 6) Johan Casselgren：Road Surface Characterization Using Near Infrared Spectroscopy、doctoral thesis、Luleå university of technology、2011、<http://www.opticalsensors.se/roadeye.html>
- 7) 渡邊直樹、榎本浩之、館山一孝、山本朗人、田中聖隆、高橋修平、岩本明子、佐々木亮介、ヌアスムグリ・アリマス：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、雪氷、73(4)、pp213-224、2011.
- 8) 高橋尚人、徳永ロベルト、切石亮、山本朗人、田中聖隆、榎本浩之、館山一孝、高橋修平：マイクロ波放射計を用いた冬期路面のすべり抵抗値評価に関する研究、第 27 回寒地技術シンポジウム、pp115-119、2011.