

路面雪氷のセンシング技術の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～平 30

担当チーム：寒地交通チーム

研究担当者：石田樹、高橋尚人、徳永ロベルト、
佐藤賢治、中島知幸、藤本明宏、佐藤昌哉、
齊田光

【要旨】

本研究では、道路交通の支障とならず、雪氷路面の状態（雪氷量、路面のすべりやすさなど）を評価可能な路面雪氷のセンシング技術の開発を目的として、近赤外光を用いた非接触式路面センサを開発するとともに舗装および雪氷層表面の近赤外光反射率の特性に着目した路面状態判別アルゴリズムの開発を行った。加えて、屋外試験により非接触式路面センサおよび路面状態判別アルゴリズムの計測精度検証を行った。この結果、開発した手法を用いると日射量が小さい条件下では高い精度で路面雪氷状態（乾燥、湿潤、積雪および凍結）の判別が可能であり、既存の非接触式路面センサと比較して高い応答速度で路面状態計測が可能となることが明らかになった。
キーワード：路面雪氷状態、センシング、近赤外光

1. はじめに

積雪寒冷地において、凍結防止剤やすべり止め材の散布（以下「散布」と表記）は基本的な凍結路面対策として実施されているが、維持管理コストの縮減や散布による環境負荷低減の観点から、散布の一層の効率化が必要である。冬期道路管理マニュアルには、「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」と記されており、道路管理者は道路パトロールや気象データの活用などに取り組んでいるが、路面上の雪氷量などを計測する実用的な技術がないため、散布の判断・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。また、道路管理者は交差点やカーブ区間に限定して散布する「スポット散布」を行っており、当研究所では適切な散布判断のためすべり計測を行っている。路面のすべり抵抗値計測はタイヤと路面間に生じる摩擦力を計測する手法を主に採用しているため、カーブ区間での計測の正確性などに課題がある。

このような背景を鑑み、本研究では道路交通の支障とならず、雪氷路面の状態（雪氷量、路面のすべりやすさ）を評価可能な路面雪氷のセンシング技術の開発を行った。

2. 研究方法

本研究では、従来の路面雪氷センシング手法の課題であったカーブ区間における計測値の正確性や計

測機器の可動部の多さに起因するメンテナンスの煩雑さ、タイヤ-路面間の摩擦力計測という計測原理に起因する機器のサイズおよび重量を改善するために、光波を用いた非接触式路面センシング技術を開発した。詳細を以下に示す。

2. 1 光波を用いた路面判別手法の構築

路面状態の評価に用いられる光波等は、①可視光（おおよそ 380nm～780nm）、②近赤外線（おおよそ 780nm～2500nm）および③マイクロ波（1mm～1m程度）に分類される。以下にそれぞれの特性を示す。

①可視光を用いた路面状態評価に関する研究

村田ら¹⁾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。Alimasi²⁾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³⁾、堤ら⁴⁾、Casselgren ら⁵⁾）。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

マイクロ波は地球の水環境の衛星観測などに用いられており、路面判断では、渡邊ら⁶⁾、高橋ら⁷⁾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という特徴を有する。

以上より、技術の汎用性・実用性に優る近赤外光を対象として検討を行った。本研究では、近赤外光の分光特性と路面雪氷状態の関係を屋外実験により計測した。実験では、図1に示す装置を用いて40cm×40cmの密粒度アスファルト舗装供試体に可視光および近赤外光を照射し、可視赤外分光放射計を用いて、乾燥路面、湿潤路面および凍結路面における反射光の分光特性を計測した。また、本実験で得られた分光特性を用いて路面雪氷状態を分類するための決定木を機械学習により生成した。

2.2 近赤外光を用いた非接触式路面センサの開発および精度検証

本研究では、2.1で得られた結果を基に小型軽量の近赤外光による車載式路面雪氷状態センサ（以下「光学式路面センサ」）を開発した。光学式路面センサは3波長（980nm、1390nmおよび1550nm）の発光体および受光部から構成され、図2に示すように車両前部に搭載される。本センサは路面状態の急変を捉えるために0.1秒間隔で3波長の反射率を出力し、路面雪氷状態の判別値、氷膜厚さおよび路面すべり摩擦係数を3波長反射率から算出するシステムとした。これらの計測値は時刻および位置情報と同期することで車両の走行経路における路面状態を連続的に計測できるようにした。

また、本研究では上述した光学式路面センサの計測精度を検証するために屋外実験を行った。実験では、苫小牧寒地試験道路内に乾燥、湿潤、凍結および積雪路面を作成し、これらの路面における水膜、氷膜および積雪厚さを計測するとともに、既存の路面状態計測装置（LWFT：路面すべり測定車、CFT：連続路面すべり計測装置）と開発した光学式路面センサを用いてこれらの路面を走行し路面すべりを計測し、光学式路面センサの路面雪氷状態計測値と既存の路面状態計測装置による路面雪氷状態計測値を比較した。

3. 研究結果

3.1 光波を用いた路面判別手法の構築

図3は夜間に計測された乾燥路面における光波の

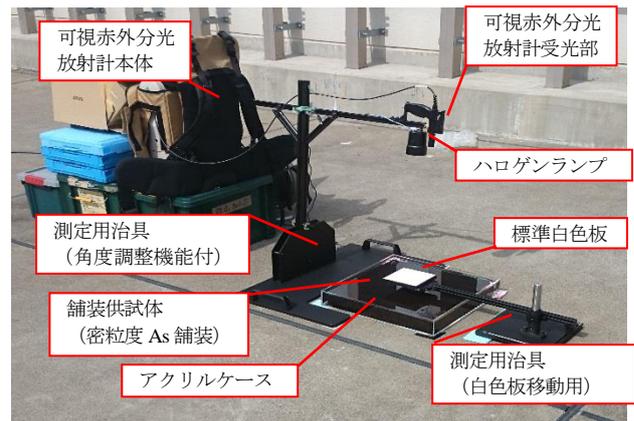


図1 近赤外光分光特性の計測装置



図2 車載式路面センサ

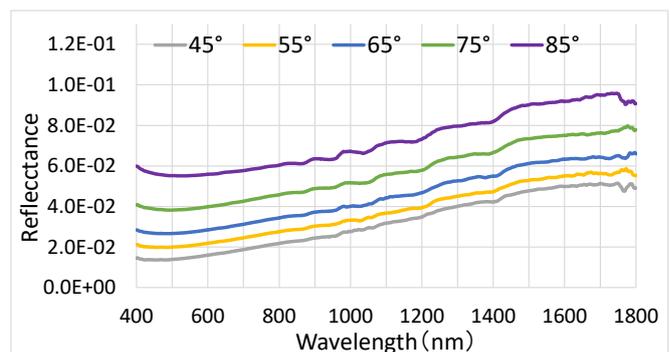


図3 乾燥路面における照射角度毎・波長毎反射率

照射角度毎および波長毎の反射率を示す。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。

図4は夜間に計測された湿潤路面における光波の照射角度毎および波長毎の反射率を、図5は夜間に計測された凍結路面における光波の照射角度毎およ

び波長毎の反射率をそれぞれ示す。湿潤路面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たものとなった。一方で、図3に示す乾燥路面の波形と、図4および図5に示す湿潤および凍結路面の波形は大きく形状が異なり、湿潤路面では水膜による吸光により1500nmから1600nmの間で反射率が概ね0となった。また、凍結路面では吸光が生じる波長帯は概ね1400nmから1550nmであり、湿潤路面とは異なる波長帯での吸光が見られた。

図6は夜間に照射角度75度で計測した凍結路面における氷膜厚毎・波長毎の反射率を示す。1200nmから1400nmおよび1500nm以上の波長帯では、光波の反射率は氷膜厚の増加に伴い小さくなる傾向が見られた。

なお、積雪路面では乾燥、湿潤および凍結路面と比較して全ての波長帯で反射率が高くなり、この傾向は1000nm未満の可視光に近い領域でより顕著であった。

以上の結果より、1000nm付近、1400nm付近および1550nm付近の光波の反射率を計測すると路面雪氷状態の判別および氷膜厚の推定ができる可能性があることが明らかとなった。これらの結果を基に機械学習を用いて生成した路面雪氷状態判別のための決定木を図7に示す。図中のX[1]は波長1400nmの光波反射率に対する波長980nmの光波反射率の比を、X[2]は波長1550nmの光波反射率に対する波長1400nmの光波反射率の比をそれぞれ示す。また、図中のvalueは44個の計測データをサンプルとして用いた時の分類結果を表しており、左から乾燥、凍結、積雪および湿潤路面へ分類されたデータの数を示している。

3.2 近赤外光を用いた非接触式路面センサの開発および精度検証

図8は本研究で開発した光学式路面センサおよび路面雪氷状態判別アルゴリズムを用いた時の雪氷路面における路面雪氷状態判別値と雪氷厚さ計測値を示す。また、同図には連続路面すべり抵抗測定装置によって計測されたすべり抵抗値(HFN)を併せて示す。本研究で開発した手法を用いると、凍結路面区間に進入すると即座に凍結路面が生じていることが検出された。また、本手法で計測された路面の氷膜厚さは0.5mmから1.5mm程度であり、膜厚計による

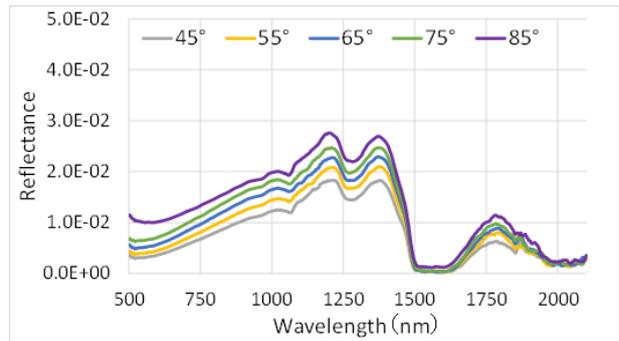


図4 湿潤路面における照射角度毎・波長毎反射率

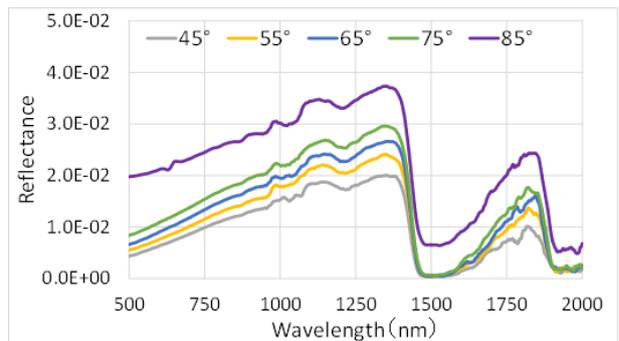


図5 凍結路面における照射角度毎・波長毎反射率

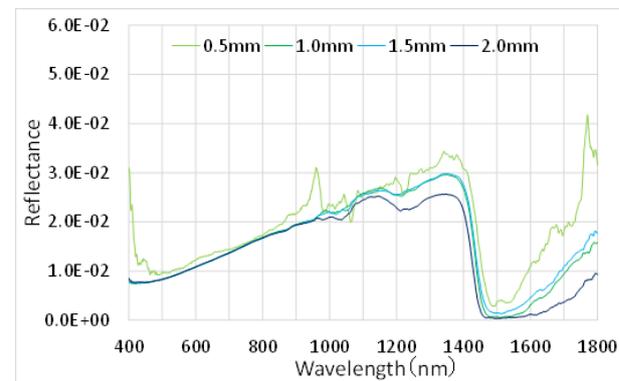


図6 凍結路面における氷膜厚毎・波長毎反射率 (光波照射角度：75度)

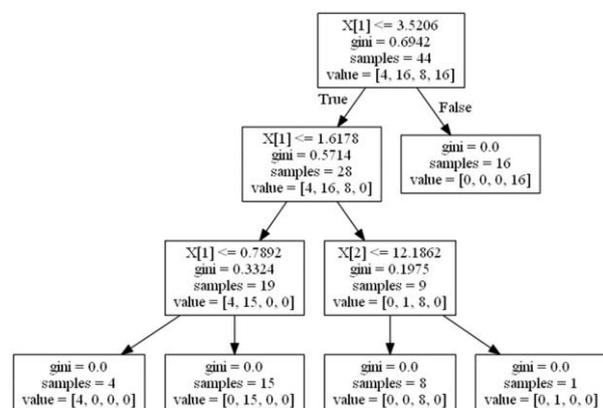


図7 路面雪氷状態判別に用いる決定木

実測値 (0.8mm から 1.5mm) と概ね一致した。さらに、積雪路面および湿潤路面においても各区分への進入とほぼ同時に積雪および湿潤路面を検出し、本手法を用いると表 1 に示すように高い精度で路面状態の判別ができることが明らかになった。これらの路面状態の検出に要する時間は概ね 0.1 から 0.2 秒程度であり、既存の光学式路面センサと比較して良好な応答性を有していることが確認された。

図 9 は光学式センサにより得られた雪氷厚さを基に推定した路面すべり摩擦係数と路面すべり計測車により得られた路面すべり摩擦係数実測値の関係を示す。本実験環境下ではシャーベット路面などの中程度のすべり摩擦係数を有する路面での検証はできなかったものの、光学式センサによる路面すべり摩擦係数推定値は路面すべり摩擦係数実測値と概ね 1 対 1 の関係となり、路面すべり摩擦係数推定値と実測値の間の決定係数は約 0.86 と良好であった。

これらの結果より、本研究で開発した光学式センサは路面の雪氷状態やすべり摩擦係数を良好な精度で計測することが可能であり、かつ高速な応答性を有していることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では道路交通の支障とならず、雪氷路面の状態 (雪氷量、路面のすべりやすさなど) を評価可能な路面雪氷のセンシング技術の開発を目的として、近赤外光を用いた非接触式路面センサを開発するとともに舗装および雪氷層表面の近赤外光反射率の特性に着目した路面状態判別アルゴリズムの開発を行った。以下に得られた知見を示す。

- 近赤外光反射率の分光特性は路面雪氷状態によって大きく異なり、1000nm 付近、1400nm 付近および 1550nm 付近の波長帯における反射率を計測することで路面状態の判別が可能となる
- 凍結路面における近赤外光反射率は氷膜の厚さによって変化し、1200nm から 1400nm および 1500nm 以上の波長帯では氷膜厚の増加に伴い反射率が小さくなる
- 上記の特性を基に作成した 3 波長 (980nm、1390nm および 1550nm) の反射率を計測する装置および路面状態判別アルゴリズムを用いると、路面雪氷状態および路面すべり摩擦係数を良好な精度で高速に計測可能であることが明

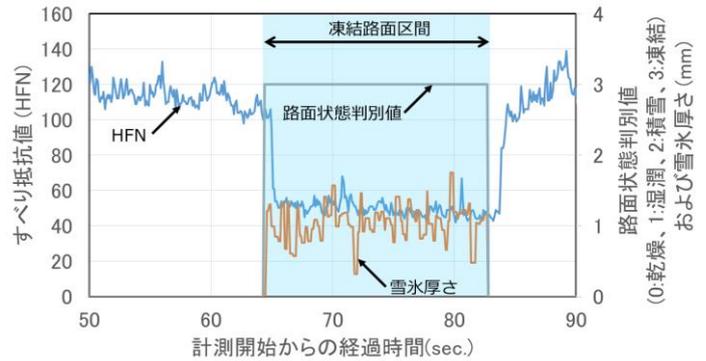


図 8 凍結路面における路面状態判別値、雪氷厚さおよびすべり抵抗値

表 1 各区分走行時の路面状態判別率的中率および応答時間 (日没～夜間、走行速度 20km/h)

路面状態	判別率的中率(%)	平均応答時間 (msec)
乾燥	100.0	-
湿潤	88.1	200
積雪	96.3	-
凍結	99.8	100

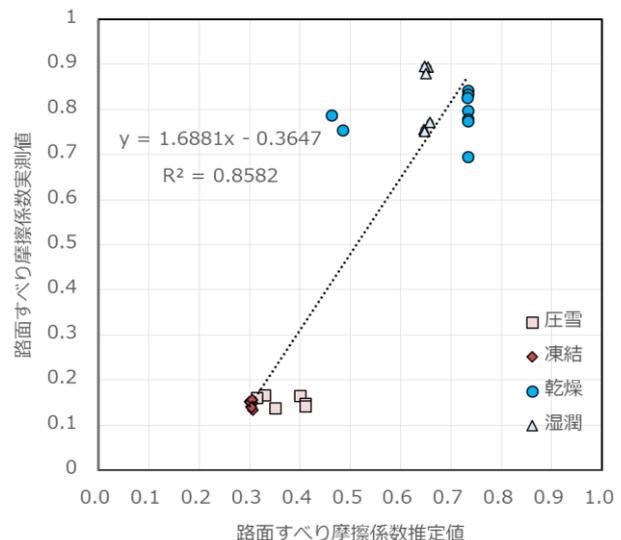


図 9 光学式センサによるすべり摩擦係数推定値と路面すべり計測車によるすべり摩擦係数実測値の関係

らかになった

今後は本研究で得られた成果を基により多様な条件下で路面状態の計測を行い精度検証等に必要データを蓄積するとともに、凍結防止剤の散布支援などへの活用を目指す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Patrik Jonsson、Torgeir Vaa、Felix Dobsław and Benny Thörnberg、Road condition imaging - model development、Transportation Research Board 94th Annual Meeting、2015.
- 4) 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.
- 5) Johan Casselgren : Road Surface Characterization Using Near Infrared Spectroscopy、doctoral thesis、Luleå university of technology、2011、
<http://www.opticalsensors.se/roadeye.html>
- 6) 渡邊直樹、榎本浩之、舘山一孝、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.
- 7) 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、舘山一孝、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.

A STUDY ON DEVELOPMENT OF ROAD SURFACE CONDITION SENSING TECHNOLOGY

Research Period : FY2015-2018

Research Team : Cold-Region Road Engineering
Research Group (Traffic Engineering
Research Team)

Author : ISHIDA Tateki

TAKAHASHI Naoto

TOKUNAGA Roberto

SATO Kenji

NAKAJIMA Tomoyuki

FUJIMOTO Akihiro

SATO Masaya

SAIDA Akira

Abstract : This research aims to develop the sensing technology of road snow/ice condition without traffic interruption. We developed road snow/ice condition sensor with near infrared light and algorithm to estimate road snow/ice condition, ice thickness and friction coefficient on road. As a result, the developed method and sensor can estimate road snow/ice condition and friction coefficient on road precisely at dark condition. In addition, the response time of measurement is faster than conventional road sensor using infrared light.

Key words : road snow/ice condition, road surface sensing, near infrared light