# 近赤外偏光分光計測による路面状況の識別 Identification of Road Surface by Spectral Polarimetry

岩間大舗(北海道科学大学短期大学部),北川浩史(北海道科学大学),城戸章宏(北海道科学大学短期大学部),長沼要(金沢工業大学) Daisuke Iwama, Hiroshi Kitagawa, Akihiro Kido, Kaname Naganuma

## 1. はじめに

近年,産官学が一体となった自動運転技術の開発・実用化推進の体制が整えられ, 平成32年代には完全自動走行の実現を目指している中で,自動運転技術の普及によっ て,交通事故の削減,渋滞の緩和,そして高齢者等の移動支援が可能となると思われ る.しかしながら積雪寒冷地での適用には技術的課題が多く,自動ブレーキであって も冬期間の適用は困難であるのが実情である.これらの課題を克服するには路面の滑 りやすさを定量的に把握することが必要である.

路面µセンサの開発例としては、車輪を用いた接触式とカメラなどを用いた非接触 式に大別される.前者では、車軸に取り付けた歪センサと ABS 装置とによるリアルタ イムµ計測が報告されている<sup>1)</sup>.この手法は路面µの定量計測が可能であるが、制動な どの操作が必要となる.後者では、水や氷などの透明体が偏光特性を有することに着 目した近赤外偏光分光計測による研究が報告されている<sup>2)</sup>.これによってドライ、ウエ ット、凍結の各状態の分類にはある程度成功しているが、凍結路面µの定量には至っ ていない.一方、凍結路面µは路面の表面粗さによって特定し得ることが報告されて おり<sup>3)</sup>、凍結路面の表面粗さ状態が測定できればµの推定が可能となる.

本研究は各種雪氷路面における摩擦係数µの定量計測手法確立を目的として取り組み,これまで図1に示すようにある程度の成果を上げており,凍結路面に近赤外線を入射させた場合の反射光の偏光現象を分光計測手法に応用し,乾燥路面および凍結路面の識別,凍結路面の滑りやすさ定量化手法を構築し<sup>4)</sup>,次に,本手法の測定理論の検証と計測精度についての理論的考察,ならびに圧雪路面への適用手法について<sup>5)</sup>報告を行い,さらに単なる湿潤路面と表面に水膜が形成された凍結路面との識別手法の構築をした<sup>6)</sup>.本稿では,以上を取りまとめ,近赤外偏光分光を用いた雪氷路面µの定量計測手法について紹介する.

# 2. 実験装置及び方法

## 2.1 **偏光分光計測の原理**<sup>7)</sup>

図2に示すように、アスファルト上に凍結層(氷)と融解層(水膜)を有する路面に光が



図1 これまでの成果の概略図



- 77 -





図3 水および氷の偏光強度比の理論計算値

図4 偏光分光計測装置の構成

入射する場合を想定する.入射側媒質および透過側媒質の屈折率をそれぞれ n<sub>1</sub>および n<sub>2</sub>,入射角と反射角を θ<sub>1</sub>とすると,屈折率の異なる二つの物質の界面に,ある角度を もって光が入射するとき,電場の振動方向が入反射面に平行(P)および垂直(S)な偏光成 分の強度は反射物質表面の物性や表面粗さに影響される.

物体表面から反射する光のP偏光成分RpとS偏光成分Rsの強度比は入射光強度I<sub>0</sub>, 入反射角度θ<sub>1</sub>,および透過角度θ<sub>2</sub>を用いて次式で表される.

$$\frac{R_p}{R_s} = \left(\frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2 - \sin\theta_1 \sin\theta_2}{\cos\theta_1 \cos\theta_2 + \sin\theta_1 \sin\theta_2}\right)^2 \quad (1)$$

上式にスネルの法則とn1に空気の屈折率である1を代入すると次式が導かれる.

$$\frac{R_p}{R_s} = \frac{\cos^2\theta_1 (n_2^2 - \sin^2\theta_1) + \sin^4\theta_1 - 2\cos\theta_1 \sin^2\theta_1 \sqrt{n_2^2 - \sin^2\theta_1}}{\cos^2\theta_1 (n_2^2 - \sin^2\theta_1) + \sin^4\theta_1 + 2\cos\theta_1 \sin^2\theta_1 \sqrt{n_2^2 - \sin^2\theta_1}}$$
(2)

図3は,式(2)を用いて水および氷の Rp/Rs を入反射角 θ1に対して算出した結果である. なお,水および氷の屈折率 n2はそれぞれ 1.333 および 1.309 とした.水および氷のいずれもブリュースタ角である約53度で P 波の反射率がゼロとなるため, Rp/Rs もゼロとなることが分かる.図によると,入反射角 θ1が60度,70度および 80度において,水と氷の強度比に差があることがわかる.このことから,入反射角度の設定は,60度および 80度とした.

# 2.2 近赤外偏光分光計測装置

供試計測装置の概略を図 4 に示す. タングステン光源からの光を光ファイバプロー ブと集光レンズを介して任意の入射光角度 θ<sub>1</sub>でテストピースに照射し,その反射光を 偏光板を介してプローブに受光した後,近赤外分光器に取り込んだ. その際,偏光板 を 90 度回転させて P 波と S 波を分離し,それぞれのスペクトルを測定した. テストピ ースは Z 軸ステージ上に設置し,表面反射および下地反射測定に応じてステージの高 さを調節した. なお,供試光源の波長範囲および出力はそれぞれ 350 nm~2500 nm お よび 5 W である. 実験では各種粗さのサンドペーパによって表面を研磨した氷盤,ア スファルト,および水をテストピースとして使用した. 氷盤の測定に際しては,装置 全体を冷凍庫内に設置し,約-14℃の低温状態を保った.

ここで、各種サンドペーパで研磨した氷盤の算術平均粗さの計算値 Ra と滑り摩擦係

- 78 -



数μの実測値との関係について求めた結果を図5に示す<sup>8)</sup>. 図から,氷盤のμは Raと 良好な正の相関関係にあることが分かる.また,近赤外吸収スペクトルの計測結果を 図6に示す.図から,水および氷のいずれも1400 nmよりも長波長の光を良く吸収す るものの,短波長の光はほとんど吸収せず透過することが分かる.従って,1500 nm 近辺の波長域では,下地からの反射光は水と氷に吸収されるため,下地の影響を除去 できるものと考えられる.なお,太陽光の場合も大気中の水蒸気による同様のメカニ ズムにより1500 nm付近の光は地表に到達しないため,この波長を選択すれば太陽光 は外乱とならない.よって,測定波長は1500 nmを選択した.

#### 3. 実験結果および考察

## 3.1 各種テストピースの表面反射強度比 Rp/Rs

各種テストピースに対して本計測手法を適用した際の Rp/Rs スペクトルを図 7 に示 す. なお,入反射角度は 60 度に設定した.図から, Rp/Rs の値は,概ね粉雪,圧雪, アスファルト,氷,水の順に低下し,かつ明確に識別可能であることが明らかである.

一方雪の場合,強度比が全般に高いものの 1550 nm 付近で最小となる傾向を示して いる.これは雪の中で乱反射した光のうち,とくに表面反射しにくい P 偏光成分が前 述した氷の吸収バンドによって大きくその強度を低下させたためと推測される.従っ て,雪と氷との判別は Rp/Rs の波長特性を用いることによって可能となる.また,図 8 に示すように,氷においては表面粗さの低下に伴って Rp/Rs が低下する傾向を示して おり,本手法によって車両直下の凍結路面 μ を定量し得ることが判明した.さらに,



図7 各種テストピースの Rp/Rs スペクトル





強度比 Iu/Iw

図9に示すように、入反射角度を80度とすれば、表面状態によらず氷のRp/Rsは水よりも大きくなることから、氷と水の判別も可能となると思われる.

# 3.2 下地からの反射と表面反射の強度比 lu/lw

入反射角度を80度とした場合の表面反射 Iw と1mm下からの反射 Iu の強度比を図10 に示す.図によると、水膜下に氷がある場合は、水膜下に氷がない場合よりも値が大 きくなり、氷の有無が判別可能であることが判明した.

## 4. まとめ

本手法により,各種路面の識別および雪氷路面におけるµ定量化の可能性を示すこ とができた.しかしながら,本手法による路面状況の識別は,車両直下の情報となる ため,自動運転に資するためには,前方路面に対する予測が必要となる.今後は,本 手法と画像計測とを組み合わせることによる,前方路面µのリアルタイム計測の可能 性について検討をし,取り組んでいく.

# 【参考・引用文献】

- (1) 福原輝幸,渡邊洋,荒川智之,玉置肇,2003: MASS 車による冬期路面の滑り摩擦 計測,福井大学地域環境研究教育センター研究紀要「日本海地域の自然と環境」,10, 59-66
- (2) P. Pyykönen, M. Jokela, J. Birgitta, Martinkauppi, M. Kutila, 2012: Road friction monitoring, SIRWEC 2012 Helsinki, ID 0049, 1-6
- (3) 二瓶光弥,清水健一,安藤泰之,2014:氷路面の摩擦痕断面形状計測によるタイヤ /氷摩擦の解析,自動車技術会春季学術講演会前刷集,No.58-14,13-18
- (4) 岩間大舗,北川浩史,城戸章宏,長沼要,2015:近赤外偏光分光計測による凍結路 面の表面粗さ解析(第1報),自動車技術会論文集,46(5),931-936
- (5) 岩間大舗,北川浩史,城戸章宏,長沼要,2015:近赤外偏光分光計測による凍結路 面の表面粗さ解析(第2報),自動車技術会論文集,46(5),937-942
- (6) 岩間大舗,北川浩史,城戸章宏,長沼要,2016:近赤外偏光分光計測による凍結路 面の表面粗さ解析(第3報),自動車技術会論文集,47(2),471-476
- (7) 田幸敏治ほか、1981:光学的測定ハンドブック、東京、朝倉書店、4-6
- (8) 城戸章宏, 2010:各種路面の光学特性計測に関する研究-第2報 NIR 分光器による計測-, 北海道自動車短期大学研究紀要, 35, 1-10