

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) *

岩間 大輔¹⁾ 北川 浩史²⁾ 城戸 章宏³⁾ 長沼 要⁴⁾

Measurement of Surface Roughness of Icy Road Surface by Spectral Polarimetry (Second Report)

Daisuke Iwama Hiroshi Kitagawa Akihiro Kido Kaname Naganuma

The influence of road surface conditions on traffic accidents is remarkable, especially in snowy countries. And accidents caused by polished ice on the surface of roads are still serious problem in winter. A remote sensing method for road surface conditions will be effective for the reduction of accidents. NIR spectroscopic method was applied for the various surfaces covered in ice and the possibility to detect the friction coefficient was reported on the previous study. In this paper shows a theoretical verification for this method and the possibility for applying a snow surface.

KEY WORDS: Safety, Road Environment, Vehicle Sensor, Spectral Polarimetry, NIR, Friction Coefficient, Icy Road (C1)

1. まえがき

スパイクタイヤによる粉じん公害防止のため、スタッドレスタイヤが普及して以来、圧雪路面が磨かれるなどによって路面 μ が特に低いブラックアイスバーンが発生するようになった⁽¹⁾。積雪寒冷地においては、冬期に発生する事故の割合が増えており、特に冬型事故に占めるスリップ事故の割合が80%を占め、深刻な問題となっていて⁽²⁾、前方路面の摩擦係数 μ などの情報をドライバにリアルタイムで伝達するテクノロジが必要である。

路面 μ センサの開発例には、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装置によるリアルタイム μ 計測⁽³⁾、タイヤトレッド内面に加速度センサと無線モジュールを配置したセンシングテクノロジタイヤによる計測⁽⁴⁾が報告されている。これらの手法は路面 μ の定量計測が可能であるが、前方の路面情報の予測が出来ない。後者では、水が近赤外(NIR)に吸収バンドを有する特性を利用したNIR画像計測による研究^{(5), (6), (7)}、さらに、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NIR偏光分光計測による研究^{(8), (9)}が報告されているが、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⁽¹⁰⁾、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。

本研究では、これまで各種路面の撮影画像の定量化処理や、近赤外分光器による基本的な計測によって、各種路面 μ の定量化可能性について一定の成果を得た^{(11), (12), (13)}。また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、湿潤路面、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た⁽¹⁴⁾。本論文では、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を試み、氷の表面状態を表す定数として消衰係数が大きな相関を持つこと、これまでの実験結果における誤差の考察が得られた。また、本手法の雪路表面への適応性を確認し、粉雪、圧雪路における有用性を得た。

2. 実験装置および方法

2.1. 偏光分光計測の原理⁽¹⁵⁾

光は波の一種でありその振動方向は一様に分布している。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および垂直な偏光成分、すなわちp波およびs波では反射率が異なり、とくに透明な物質における反射の場合、p波の反射率はブリュースタ角に達するとゼロになる。図1に示すように、入射側媒質および透過側媒質の屈折率をそれぞれ n_1 および n_2 、入射角と反射角を θ_1 とすると、ブリュースタ角 θ_B は式(1)のようになる。

$$\theta_B = \arctan \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1)$$

水あるいは氷の表面反射に対して上式を適用すると、それらのブリュースタ角はそれぞれ 53.1° および 52.6° となる。なお、空気の屈折率 n_1 は1、水および氷の屈折率 n_2 はそれぞれ1.3334および1.309である。

*2015年5月21日受理。

2015年5月21日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・3) 北海道科学大学短期大学部 (006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

2) 北海道科学大学 (006-8585 札幌市手稲区前田7条15丁目4-1)

4) (有)KNM (061-1127 北広島市新富町西2-2-7)

一方、光学計測において入射光強度の絶対値測定や光学系設定変更時における誤差要因を排除するためには、同一条件で測定した二種類のデータの比をとる手法が有効である。従って、本研究ではp波とs波との強度比、すなわち I_p/I_s について着目した。この比は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{I_p}{I_s} &= \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \times \frac{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)} \\ &= \frac{\cos^2(\theta_1 + \theta_2)}{\cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2) \end{aligned}$$

スネルの法則から、

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1 \quad (3)$$

であるので、(2)式と(3)式とから、次式が導かれる。

$$\frac{I_p}{I_s} = \left(\frac{\cos\theta_1 \sqrt{1 - (\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1)^2} - \frac{n_1}{n_2} \sin^2\theta_1}{\cos\theta_1 \sqrt{1 - (\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1)^2} + \frac{n_1}{n_2} \sin^2\theta_1} \right)^2 \quad (4)$$

本研究の範囲では n_1 は空気の屈折率であり、1であるので、 $n_1 = 1$ 、 $n_2 = n$ 、 $\theta_1 = \theta$ とおいて式(4)を書き直すと次式となる。

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{\cos^2\theta(n^2 - \sin^2\theta) + \sin^4\theta - 2\cos\theta\sin^2\theta\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos^2\theta(n^2 - \sin^2\theta) + \sin^4\theta + 2\cos\theta\sin^2\theta\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (5)$$

滑りにくい氷盤路の表面状態は透明ではないため、屈折率nには金属の場合と同様に次式で示す複素屈折率が適用できる。

$$n = n_0 + ik \quad (6)$$

ここで、 n_0 は透明な氷の屈折率、kは消衰係数を表し、とくにkは氷の表面状態に依存するものと考えられる。式(6)を式(5)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{a + bi - c\sqrt{d+2ki}}{a + bi + c\sqrt{d+2ki}} \quad (7)$$

ただし、

$$a = (n_0^2 - k^2 - \sin^2\theta)\cos^2\theta + \sin^4\theta$$

$$b = 2k\cos^2\theta$$

$$c = 2\cos\theta\sin^2\theta$$

$$d = n_0^2 - k^2 - \sin^2\theta$$

本研究では、式(7)を用いて本手法の妥当性を検証するとともに、とくに入反射角度の設定誤差が計測精度に及ぼす影響についても検討を行うこととした。

2.2. 偏光分光計測装置

供試偏光分光計測装置の概略を図2に示す。図に示すように、タンク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_1 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°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。供試近赤外分光器の諸元を表1に示す。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。

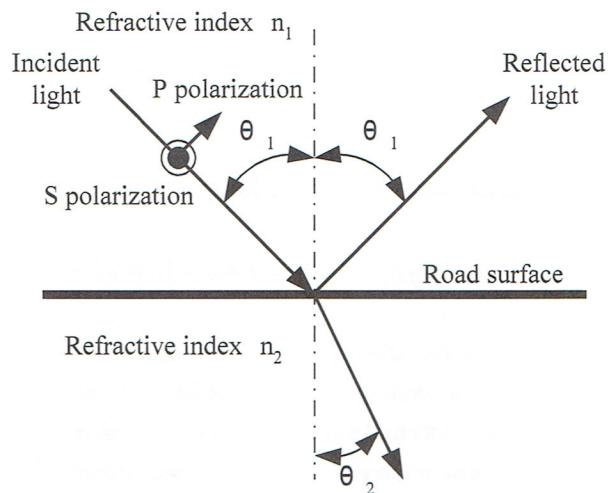


Fig. 1 Schematic of polarization and reflection

Table 1 Specifications of NIR spectrometer

Model	BTC261E NIR Spectrometer
Detector	TE cooled 512 element InGaAs array
Spectral coverage	900-1700 nm
Spectrograph optical layout	Crossed Czerny Turner
Grating	1200 lines/mm
Slit	25 μm
Digitizer resolution	16 bit
Integration time	1 ms - 65.5 s
Wavelength accuracy	Better than 0.5 nm
Dynamic range	5000:1

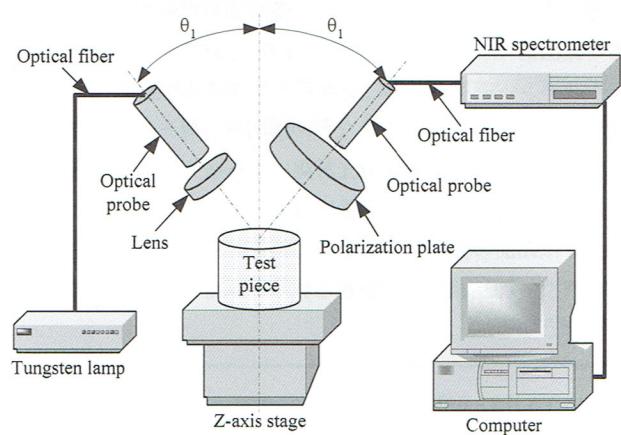


Fig. 2 Plan of the NIR Spectral Polarimetry system

Table 2 Specifications of test pieces

Test piece number	Average particle diameter (μm)	State	Density (g/cc)
#1	25	Powder	0.9
#2	6	Powder	0.82
#3	3	Powder	0.81
#4	25	Compacted	1.24
#5	6	Compacted	1.17
#6	3	Compacted	1.13

2.3. 圧雪路試料の作成

道路雪氷は、新雪、粉雪、粒雪、圧雪、氷板、氷膜、および氷べた雪の7種類に分類され、とくに今回の測定対象とした粉雪および圧雪の粒度は0.2 mm以下と報告されている⁽¹⁶⁾。

実験では、雪路の種類が本計測におよぼす影響を検討するため、雪の粒度ならびに密度をパラメータに設定した。しかし、実際の雪では密度に変更を加えた場合、融解や再結晶などが発生するためその設定は容易ではない。従って、氷とほぼ同等の屈折率を有するテフロンパウダを使用して試料を作成した。

各種試料の諸元を表2に示す。表に示したテストピースナンバ#1は平均粒径25 μm のテフロンパウダを容積約30ccのシャーレに圧力をかけずに充填したもので、全体の密度を0.9 g/cc程度とした。一方、#4は#1を40%程度圧縮したものである。また、一例として実際の粉雪とそれを40%程度圧縮した圧雪も用いた。

3. 実験結果および考察

3.1. 各種氷盤路面における消衰係数kの特定

入反射角度 θ が60°、測定波長1500 nmにおける各種氷盤路における近赤外反射光のp波とs波との強度比、すなわち Ip/Is について前回測定した結果は図3のとおりである⁽¹⁴⁾。なお、図の横軸の算術平均粗さ R_a は路面との摩擦係数 μ と正の相関を示し、 R_a が1および20 μm で μ はそれぞれおよそ0.1および0.25である。このデータを基に式(7)を用いて、まず図3における水の実験データによって正確な θ を算出したところ、60.4°が得られた。次にこのデータを反映させたうえでkの算出を行った。

特定したkの値を図4に示す。図によれば、kは R_a の増加に伴って増加することが明らかであり、kは氷の表面状態を表す重要なファクタであることが分かった。

次に、得られたkを式(7)に代入し、 θ が30°、70°、および80°における過去の実験データとの比較を試みた。これらの結果をそれぞれ図5、6、および7に示す。なお、修正し

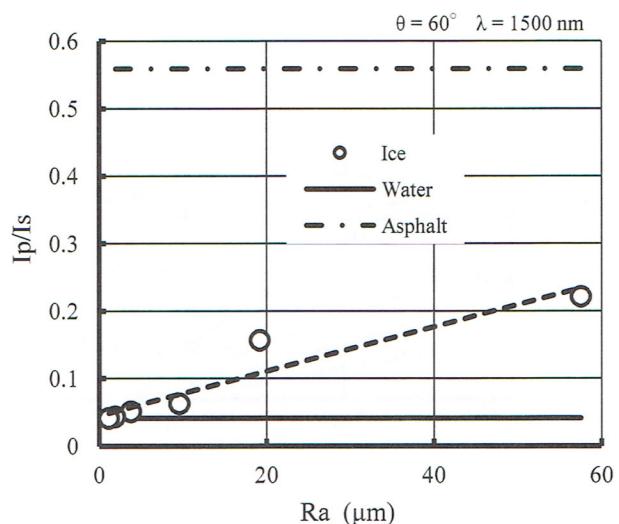


Fig. 3 Relation between Ip/Is and arithmetic mean roughness, R_a
($\theta_1 = 60^\circ$)

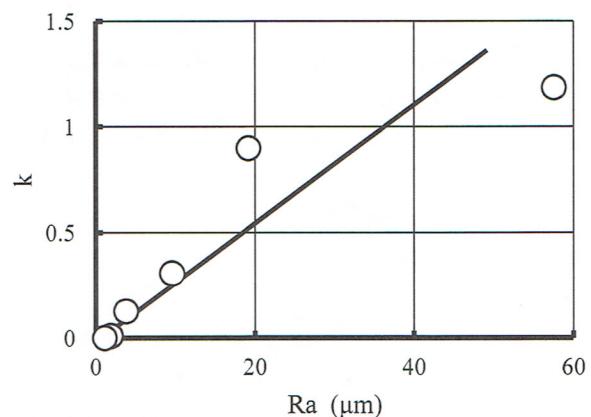


Fig. 4 Calculated extinction coefficient, k

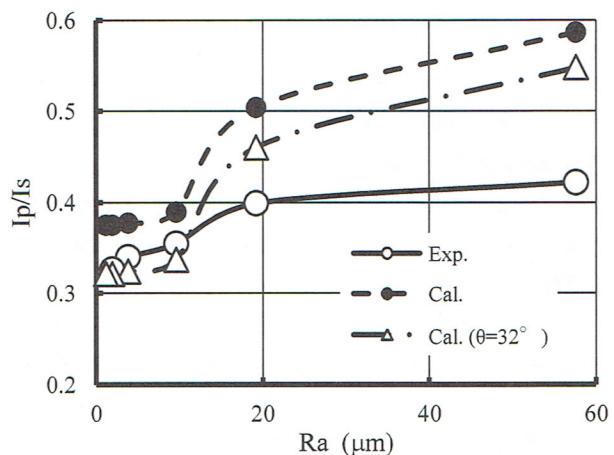


Fig. 5 Comparison of calculated Ip/Is and experimental Ip/Is
($\theta = 30.1^\circ$)

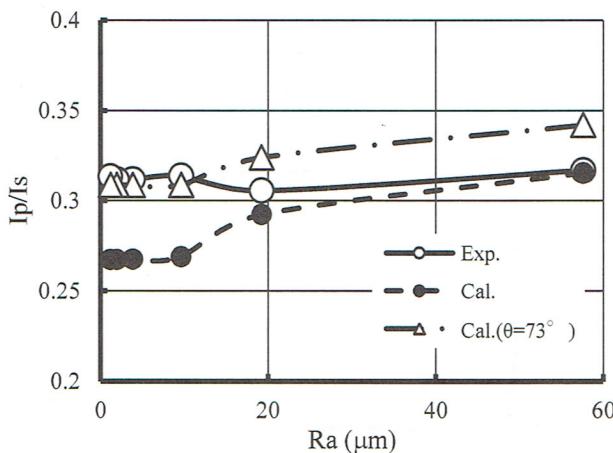


Fig. 6 Comparison of calculated Ip/Is and experimental Ip/Is
($\theta = 71.5^\circ$)

た θ の値はそれぞれ 30.1° , 71.5° , および 80.4° であった。図 5, 6, および 7 から、いずれも中抜き丸で示した実験値と黒丸で示した計算値とは定性的に一致するものの、その値には若干の差異があることが分かる。そこで、一例として θ をそれぞれ 32° , 73° , および 83° に修正した結果を三角で示した。図から明らかなように、修正によって実験値との差異は縮小し、とくに図 7 では R_a が 20 に至るまで、定量的にもほぼ一致が得られることが分かる。

以上の結果から、 θ が 70° および 80° の場合 Ip/Is が R_a に対してほとんど感度を有しないことが、計算によっても証明できた。

3.2. 入反射角 θ の設定誤差が測定値に及ぼす影響

前節の結果は本手法において光学系の厳密な設定が精度向上の鍵であることを示唆している。ここでは θ の設定誤差、すなわち $\Delta\theta$ が偏光強度比 Ip/Is の測定に及ぼす影響について、式(7)を用いた数値解析による解明を試みた。なお計算対象は全て氷盤路面とした。

本実験の設定誤差に相当する $\Delta\theta$ が $\pm 2^\circ$ における θ と Ip/Is の測定誤差との関係を図 8 に示す。図の縦軸は、設定角度プラス 2° とマイナス 2° における Ip/Is の差を設定角度における値で除算し、百分率で示したものである。図から、透明な氷を表す k が 0 の場合、全般に誤差が大きく、とくに氷のブリュースタ角に相当する 50° 近辺では著しくなること、 k が 0.6 以上では θ のいかんにかかわらず誤差は概ね 35% 以下となることが分かる。

図 9 は図 8 の横軸を k に置き換えて表示したものである。図から明らかなように、 k の増加に伴って、全般に誤差は小さくなることが分かる。本研究において最も氷盤路面の状態を量化し得る入反射角度である 60° では、 k が 0.6 以下では他の角度に比べて誤差が大きくなるものの、それ以上では小さくなり、約 35% 以下となることが判明した。

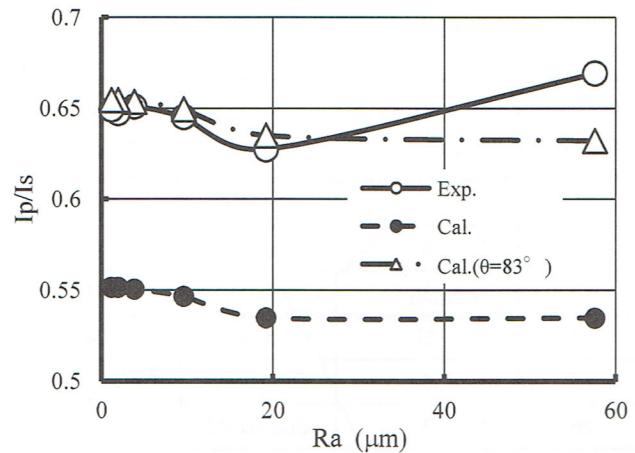


Fig. 7 Comparison of calculated Ip/Is and experimental Ip/Is
($\theta = 80.4^\circ$)

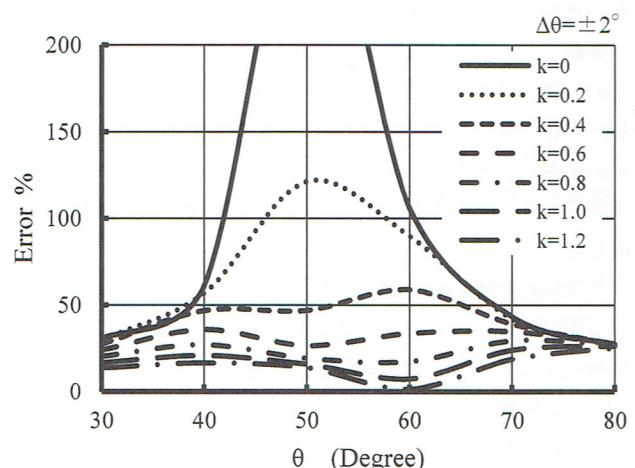


Fig. 8 Influence of θ on calculated Ip/Is error
($\Delta\theta = \pm 2^\circ$)

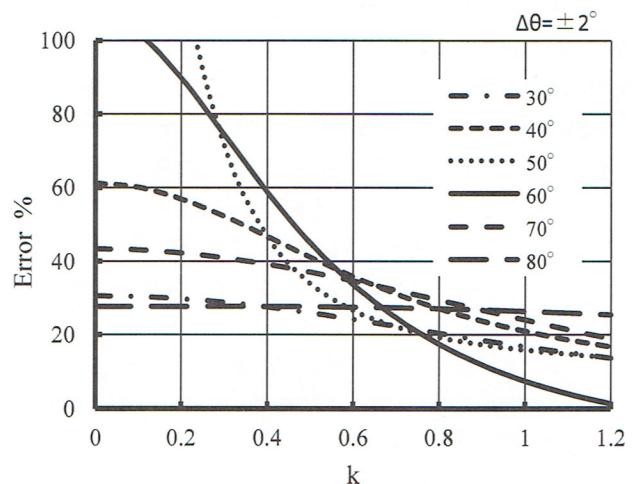


Fig. 9 Influence of k on calculated Ip/Is error
($\Delta\theta = \pm 2^\circ$)

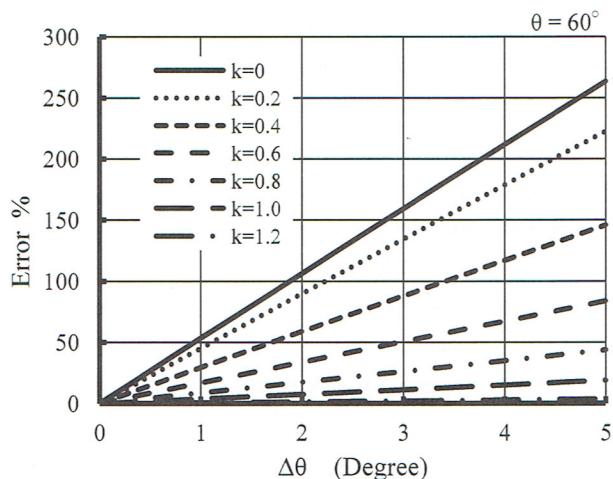


Fig. 10 Influence of $\Delta\theta$ on calculated Ip/Is error
($\theta = 60^\circ$)

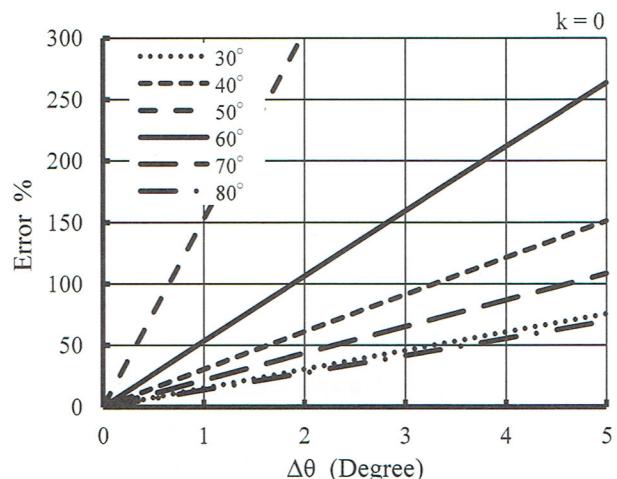


Fig. 11 Influence of $\Delta\theta$ on calculated Ip/Is error
($k = 0$)

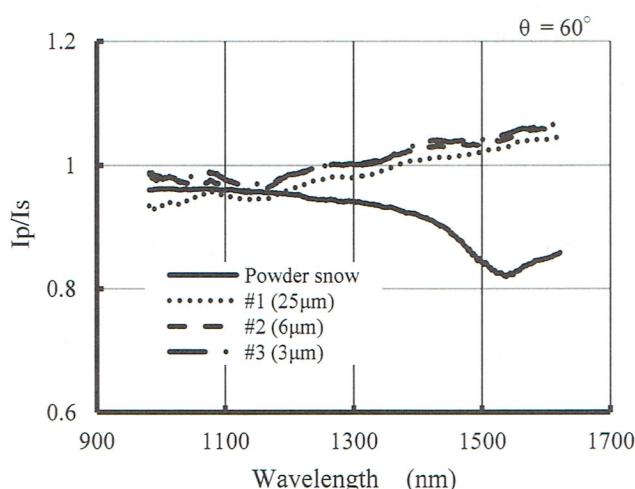


Fig. 12 Ip/Is spectra of powder snow

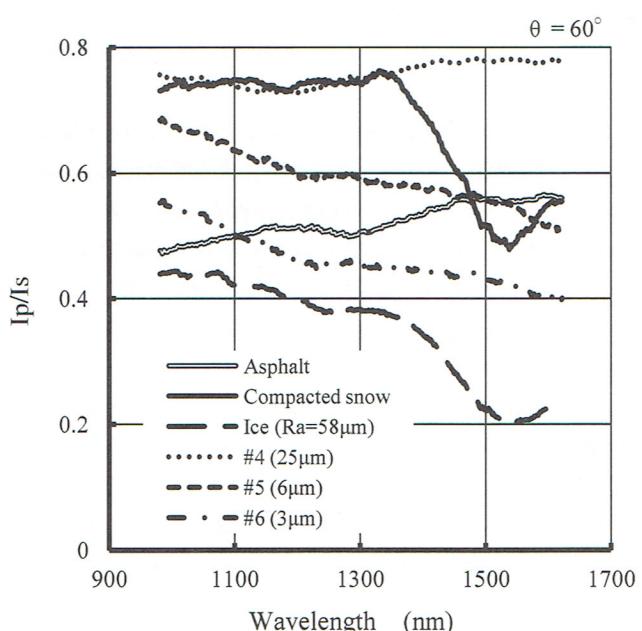


Fig. 13 Ip/Is spectra of compacted snow

ここまで、 $\Delta\theta$ が $\pm 2^\circ$ の場合について検討したが、 $\Delta\theta$ が誤差に及ぼす影響について調べた結果を図10および図11に示す。なお図10は θ が 60° 、図11は k が0の場合をそれぞれ示す。図10から、 k のいかんにかかわらず $\Delta\theta$ の増加に伴なって誤差は直線的に増加すること、その程度は k の増加に伴なって減少することが分かる。図11から、 θ のいかんにかかわらず $\Delta\theta$ の増加に伴なって誤差は直線的に増加することが分かる。なお、その程度は 50° において著しくなる。

3.3. 粉雪および圧雪の強度比スペクトル

表2に示した試料#1、#2、および#3の偏光強度比 Ip/Is スペクトルを図12に示す。なお、一例として氷点下5度以下の札幌に降った粉雪について測定したデータも併記した。図から、粒径のいかんにかかわらず粉雪を模擬した試料の Ip/Is は、とくに低波長域で実際の粉雪と同様にほぼ1となり、偏光による差異がほとんど発生していないことが分かる。

図12で用いた試料を40%程度圧縮した試料、#4、#5、および#6による Ip/Is スペクトルを図13に示す。なお、一例として図12で用いた粉雪を40%程度圧縮した圧雪の結果も併記した。図から、圧雪を模擬した試料の Ip/Is は全般に1よりも小さく、粒径の減少に伴なって R_a が $58 \mu m$ の比較的表面が粗い氷板のスペクトルに分布形状および数値共に漸近することが分かる。一方、試料#4のスペクトルは1350 nm以下の範囲で実際の圧雪にはほぼ一致することも判明した。しかし、粒径の比較的大きな試料#4、#5、および実際の圧雪においては、アスファルト路面のスペクトルを超える場合があることが分かった。

以上の結果から、とくに低波長域において粉雪における

I_p/I_s は偏光の影響を示さずほぼ 1 となるため、その値がほぼ 0.5 であるアスファルトとの峻別が可能である。また実際の粉雪および圧雪によるスペクトルが 1500 nm 付近で極小となるのは、氷の吸収スペクトルが当該波長で極大となることに起因するものと考えられる。

従って、圧雪については例えば 1500 nm および 1300 nm の二波長の計測によって判別が可能と考えられる。

4. 結 論

本論文では、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を試みた。

本研究によって得られた結果を要約するとおよそ以下の通りである。

1. 近赤外偏光強度比、 I_p/I_s の理論式に複素屈折率を導入することによって、各種凍結路面の消衰係数 k の算出が可能となり、各種凍結路面の算術平均粗さ R_a は k と良好な相関を示すことから、 k は氷の表面状態を表す重要なファクタであることが判明した。
2. 入反射角度 θ の設定誤差 $\Delta \theta$ が偏光強度比 I_p/I_s の測定に及ぼす影響について、数値解析による解説を試みた結果、透明な氷を表す k が 0 の場合、全般に誤差が大きく、とくに氷のブリュースタ角に相当する 50° 近辺では著しくなり、本実験の設定誤差に相当する $\Delta \theta$ が ±2° の場合、 k が 0.6 以上では θ のいかんにかかわらず誤差は概ね 35% 以下となる。
3. 粉雪における I_p/I_s はとくに低波長域において偏光の影響を示さずほぼ 1 となるため、その値がほぼ 0.5 であるアスファルトとの峻別が可能である。また、圧雪における I_p/I_s スペクトルは粉雪よりも全般に低下すると同時に 1500 nm 付近で大きく低下する傾向を示すため、例えば 1500 nm および 1300 nm の二波長の計測によって判別が可能と考えられる。

参 考 文 献

- (1) 仁平陽一郎、浅野基樹、林華奈子：車両走行が雪氷路面に与える影響について(続報)，北海道開発土木研究所月報，No. 591, p. 47-50 (2002)
- (2) 高田哲也、徳永ロベルト、高橋尚人：冬期気象条件下における交通事故発生形態について、北海道の雪氷, No. 29, p. 69-72 (2010)
- (3) 福原輝幸、渡邊洋、荒川智之、玉置肇：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」, No. 10, p. 59-66 (2003)
- (4) 切石亮、福原輝幸、森永啓詩、徳永ロベルト、高橋尚人：冬季路面状態の評価技術に関する研究について、第 25 回寒地技術シンポジウム講演論文集, p. 225-260 (2009)
- (5) 後藤彰彦、加世田将光、北川和男、島村哲郎、大道賢、土屋忠寛、石丸修、白石哲也：画像処理を用いた排水性舗装路面の排水状況評価、自動車技術会学術講演会前刷集, No. 104-05, p. 13-16 (2005)
- (6) Johan Casselgren, Michael Sjödahl, James LeBlanc: Angular spectral response from covered asphalt, Applied Optics, Vol.46, No.20, p. 4277-4288 (2007)
- (7) Massimo Bertozzi, Rean Isabella Fedriga, Carlo D'Ambrosio: Adverse Driving Conditions Albert: Investigations on the SWIR Bandwidth for Road Status Monitoring, ICIAP 2013, Part I, LNCS 8156, p. 592-601 (2013)
- (8) Johan Casselgren, Michael Sjödahl: Polarization resolved classification of winter road condition in the rear-infrared region, Applied Optics, Vol. 51, Issue 15, p. 3036-3045 (2012)
- (9) P. Pyykönen, M. Jokela, J. Birgitta, Martinkauppi, M. Kutila: Road friction monitoring, SIRWEC 2012 Helsinki, ID 0049, p. 1-6 (2012)
- (10) 二瓶光弥、清水健一、安藤泰之：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、自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 6, p. 1021-1026 (2014)
- (11) 城戸章宏：レーザによる各種路面の光学特性計測に関する研究－第 1 報 画像処理による計測－、北海道自動車短期大学研究紀要, 第 33 号, p. 7-11 (2008)
- (12) 城戸章宏：凍結路面における摩擦係数 μ の非接触計測、日本機械学会北海道支部第 49 回講演会講演概要集, No. 102-2, p. 59-60 (2010)
- (13) 城戸章宏：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, 第 35 号, p. 1-10 (2010)
- (14) 岩間大輔、北川浩史、城戸章宏、長沼要：近赤外偏光分光計測による凍結路面の表面粗さ解析、自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 5, p. 931-936 (2015)
- (15) 田幸敏治ほか：光学的測定ハンドブック、東京、朝倉書店, 1981, p. 4-6
- (16) 前野紀一、成田英器、西村浩一、成瀬廉二：道路雪氷の構造と新分類、低温科学・物理編, No. 46, p. 119-133 (1988)