

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) *

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 (Third 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 the possibility to distinguish the wet road surface from the ice surface covered by thin water. As a result, two incident/reflection angles, 60 degree and 80 degree, are needed and 1500nm wavelength is required set for this method.

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ことなどによって路面 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ー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。また、最も滑りやすい路面は氷

*2015年10月22日受理。

2015年10月14日自動車技術会秋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)

の上に水膜が形成された状態である。エリプソメトリを適用すれば氷表面の水膜の厚さを計測可能であるが、下地となる氷の表面状態が精度に及ぼす影響が大きいことが報告されている⁽¹¹⁾。

図1に示すように、本研究ではこれまで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第1報で報告した⁽¹²⁾。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第2報で報告した⁽¹³⁾。第3報となる本報では、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試みた。

2. 実験装置および方法

2.1. 偏光分光計測の原理⁽¹⁴⁾

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。図2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、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波の強度は反射物質表面の物性や表面粗さに影響される。

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。

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \times \frac{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}$$

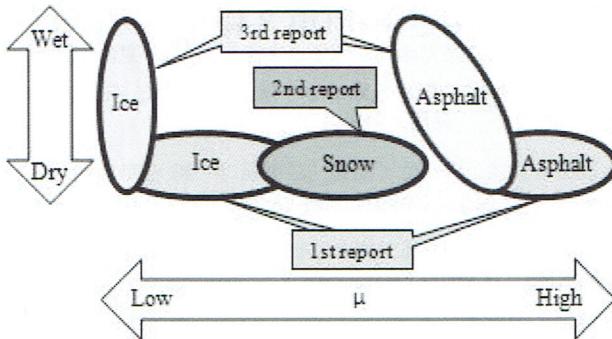


Fig. 1 Perspective image of this study

$$= \frac{\cos^2(\theta_1 + \theta_2)}{\cos^2(\theta_1 - \theta_2)} \quad (1)$$

スネルの法則は次式のとおりであるので、

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1 \quad (2)$$

式(1)と式(2)から、次式が導かれる。

$$\frac{I_p}{I_s} = \left(\frac{\cos\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1 \right)^2} - \frac{n_1}{n_2} \sin^2\theta_1}{\cos\theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1 \right)^2} + \frac{n_1}{n_2} \sin^2\theta_1} \right)^2 \quad (3)$$

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(3)を書き直すと次式となる。

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

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。

$$n = n_0 + ik \quad (5)$$

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(5)を式(4)に代入して整理すると次式が得られる。

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{a + bi - c\sqrt{d + 2ki}}{a + bi + c\sqrt{d + 2ki}} \quad (6)$$

ただし、

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

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

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

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

本研究ではこれまで、式(6)によって反射強度比 I_p/I_s が路面の表面状態を識別し得ることを報告した⁽¹³⁾。しかし路面が湿潤状態の場合、水膜の下が凍結しているかどうかを判定するには表面反射光の測定だけでは不十分と考えられる。従って、本研究では、水膜下の下地からの反射光も測定し、下地凍結有無の識別を試みた。

図3はアスファルト路面上の氷表面が溶けて厚さ ℓ (mm) の水膜が形成されている状態を示している。ここに θ_1 の角度で入

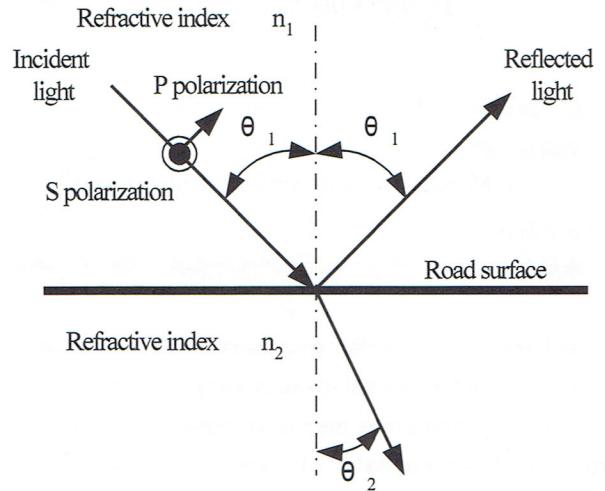


Fig. 2 Schematic of polarization and reflection

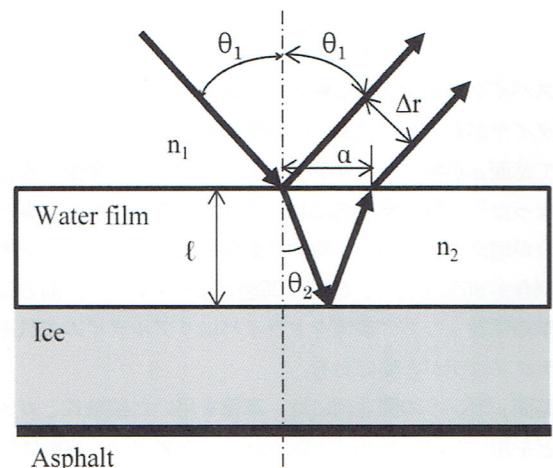


Fig. 3 Schematic of an optical refraction

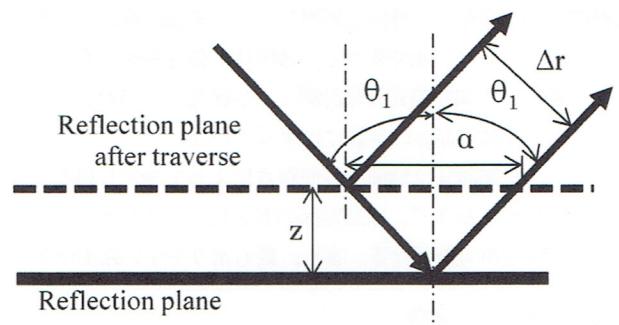


Fig. 4 Schematic of a reflection of the light

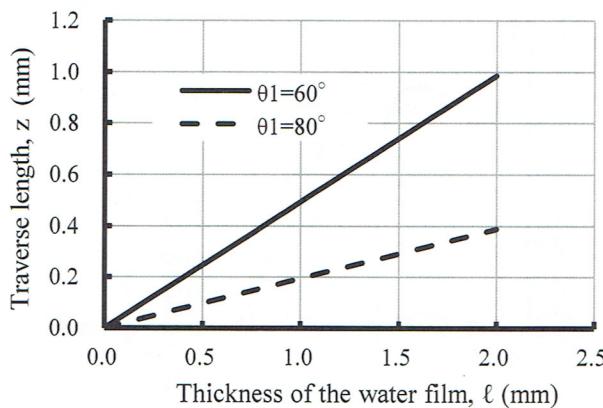


Fig. 5 Relation between the traverse length and the thickness of the water film

射した光は水膜中に θ_2 の角度で進行後、氷表面で反射し、表面反射光と Δr 離れた位置に進行する。

ここで、水膜への入射光入射位置と氷層に達した反射光が水膜から出射する位置との間の距離を α とすると、 α は次式で与えられる。

$$\alpha = 2\ell \tan \theta_1 \quad (7)$$

式(2)を上式に代入して、

$$\alpha = \frac{2\ell \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)^2}} \quad (8)$$

入反射光学系の設定を変更することなく、 α 離れた下地からの反射光を測定するためには、図 4 に示すように反射面を距離 z だけ上に移動させれば良い。従って、 ℓ と z との関係は次式となる。

$$z = \frac{\ell \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1}{\tan \theta_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right)^2}} \quad (9)$$

本研究では、式(9)を用いて反射面を任意の距離移動させることによって、下地からの反射光解析も試みた。なお、空気の屈折率 n_1 は 1、水の屈折率 n_2 は 1.3334 である。

図 5 に θ_1 が 60° および 80° の場合の水膜厚さ ℓ と上方向への移動距離 z との関係を示す。

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 6 に示す。図に示すように、タンゲ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。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。

供試近赤外分光器の諸元を表 1 に示す。なお、供試光源の

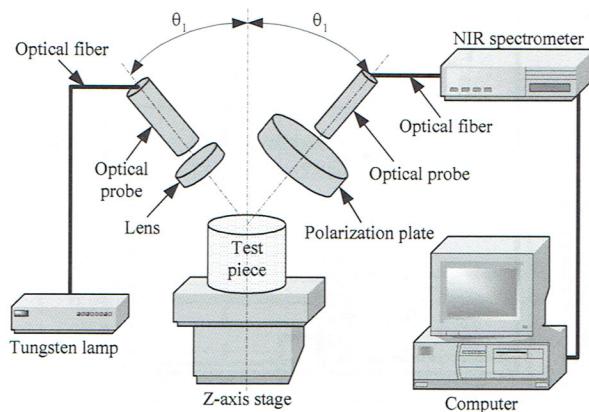


Fig. 6 Plan of the NIR Spectral Polarimetry system

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

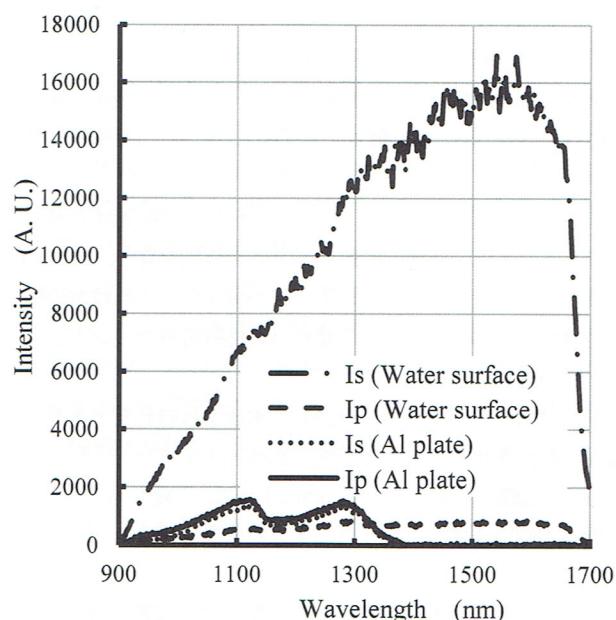
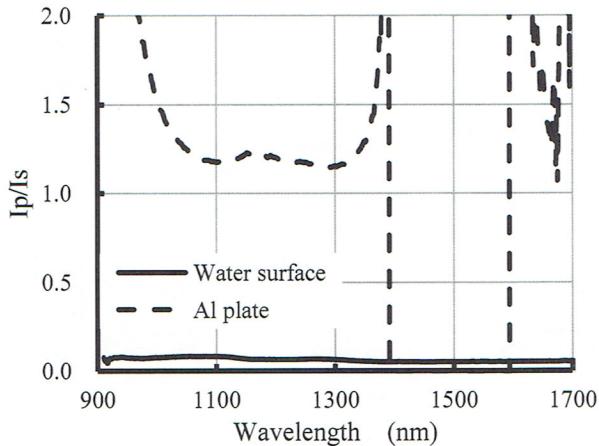


Fig. 7 Intensity of the reflected light from Al plate under the water

Fig. 8 Intensity ratio, I_p/I_s spectra from Al plate under the water

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。

2.3. 各種路面試料の作成

本実験では、下地からの反射が重要となるため、アスファルト路面を用意し、その上に水膜のみ形成されている場合、氷盤が形成されている場合、さらに氷盤表面が融解して水膜が形成している場合の 3 通りの試料を作成した。アスファルトには前田道路株式会社製の簡易アスファルト(DR プレミアム Jr) を用い、これをシャーレに任意の厚さで充填した。

氷盤上に任意の厚さの水膜を形成させた試料は、あらかじめ任意深さの窪みを設けた氷盤を用意し、そこに 0°C の水を充填して作成した。

3. 実験結果および考察

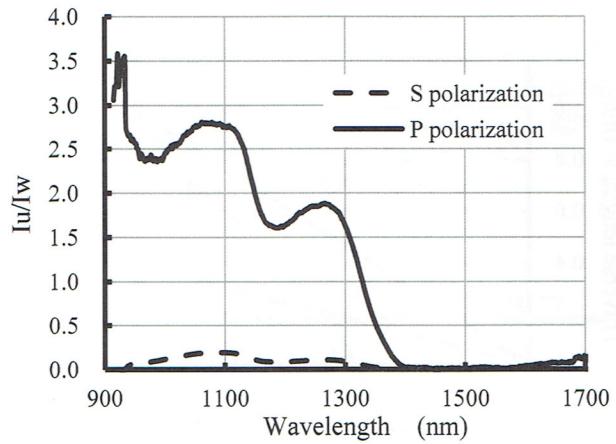
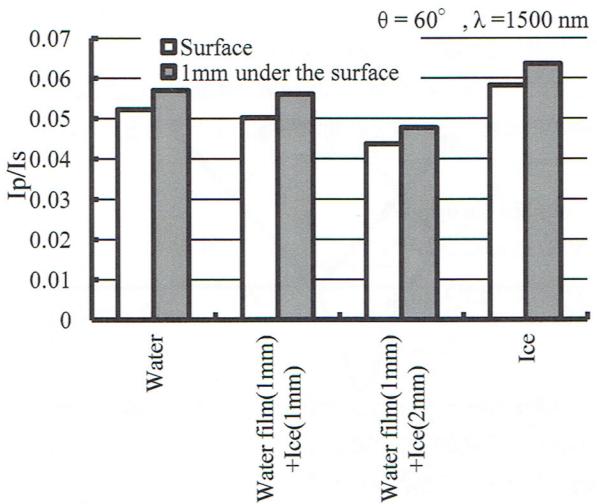
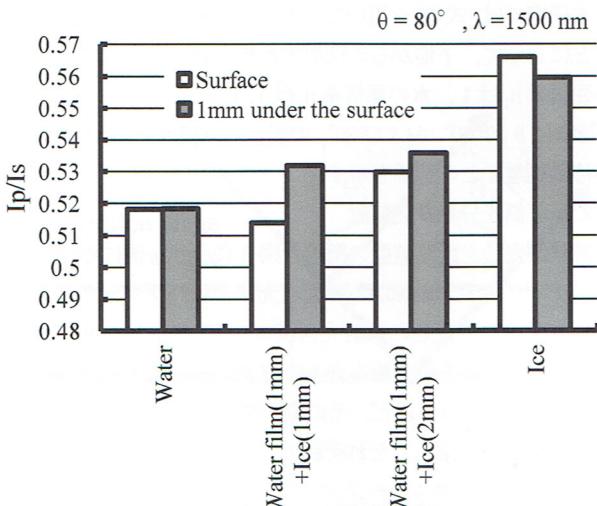
3.1. 下地からの反射光解析基礎実験

図 3 および 4 で想定した反射が起こることを確認するため、シャーレにアルミプレートを下地として設置し、その上に 4 mm の水を充填した場合の表面反射と下地反射のスペクトルを図 7 に示す。なお、入反射角度は 60° とし、下地反射測定時には式(9)に従って Z 軸ステージを上方に約 2 mm 移動させた。

図から、下地であるアルミプレートからの反射光は P 波および S 波共にほぼ同様の反射スペクトル形状を有し、1500 nm 前後の反射強度はほぼ 0 となることが分かる。これは水の吸光特性によるものであり、下地からの反射特有のバンドであることが分かる。

図 8 は図 7 のデータから算出した水面からの P 波と S 波の表面反射強度比、 I_p/I_s と下地であるアルミプレートからの I_p/I_s を比較したものである。図によれば、下地からの I_p/I_s は特に 1500 nm 前後の波長帯で大きな差異を示すことが明らかである。

一方、下地からの反射光強度を表面反射光強度で除した強度比、すなわち I_u/I_w のスペクトルを図 9 に示す。図から、

Fig. 9 Intensity ratio of the reflection from the Al plate under the water to that from the water surface, I_u/I_w Fig. 10 Comparison of I_p/I_s on several test pieces
($\theta_1 = 60^\circ, \lambda = 1500 \text{ nm}$)Fig. 11 Comparison of I_p/I_s on several test pieces
($\theta_1 = 80^\circ, \lambda = 1500 \text{ nm}$)

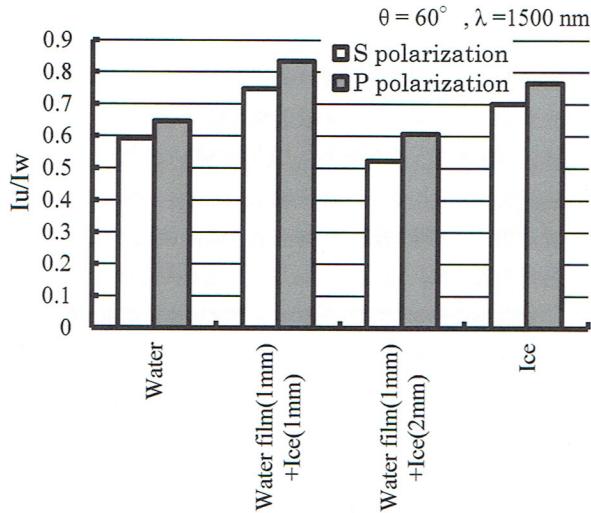


Fig. 12 Intensity ratio of the reflection from the plane of 1mm under the surface to that from the surface, I_u/I_w
($\theta_1 = 60^\circ, \lambda = 1500 \text{ nm}$)

実線で示したP波による I_u/I_w の方がS波によるものよりも全体に高い値となることが分かる。設定した入反射角度 60° では、P波の表面反射光量は少ないものの下地に到達したのち反射する光量が多いいためと考えられる。

3.2. 各種路面における反射強度比 I_p/I_s

本節ではアスファルト路面を用い、その上に3 mmの水膜を形成したもの、1 mmの氷盤に1 mmの水膜を形成したもの、2 mmの氷盤に1 mmの水膜を形成したもの、および3 mmの氷盤を形成したものの4種類のテストピースを用いて行った実験結果について述べる。

図10は入反射角度 60° の場合の表面および1 mm下層からの測定波長 $\lambda = 1500 \text{ nm}$ における I_p/I_s を示す。図から、表面反射および下層反射共に I_p/I_s は氷の表面に水膜がある場合で低く、水膜がない場合で高くなるなど、水膜下の氷盤有無識別は困難であることが分かる。

これまでの研究から、氷の表面状態を最も良く観測し得るのが 60° であり、表面粗さが小さい氷の場合、水の計測値とほぼ同様になることが判明している⁽¹²⁾。従って、水膜下の氷による I_p/I_s も水からのものと大きな差異を示さなかつたためと考えられる。

図11は入反射角度 80° の場合の結果を示す。図によれば、特に1 mm下層からの I_p/I_s が水のみの場合よりも氷が形成されている場合で大きくなっていること、すなわち水膜下の氷の有無に対して感度を有していることが分かる。入反射角度を 80° に設定することで氷の表面状態のいかんにかかわらず氷と水との識別が可能であることが判明しており^{(12), (13)}、この現象が水膜下の氷においても適用できたものと考えられる。

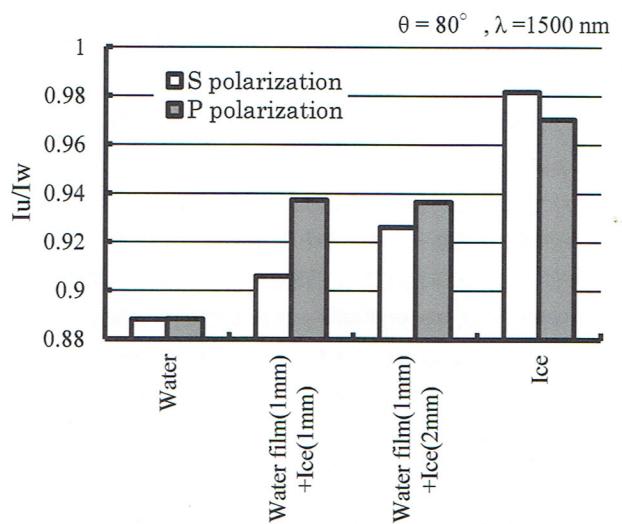


Fig. 13 Comparison of I_u/I_w on several test pieces
($\theta_1 = 80^\circ, \lambda = 1500 \text{ nm}$)

3.3. 下地からの反射強度と表面反射強度との比

本節では前節の結果を用いて、下地からの反射強度と表面反射強度との比、すなわち I_u/I_w について調べてみた。なお、この場合の下地は表面から 1mm とした。

図12は入反射角度 60° 、 1500 nm における各種テストピースの I_u/I_w について比較した結果である。図によれば、 60° の場合 P波およびS波いずれの I_u/I_w を用いても水膜下の氷の存在を判別できないことが明らかである。入反射角 60° における I_u は水膜下の下地である氷の表面状態の影響を強く受けるため⁽¹²⁾、このような結果となったものと考えられる。

一方、 80° の場合の結果を図13に示す。図からP波の場合、水膜下に形成される氷の厚さのいかんにかかわらず、水のみの場合に比べて I_u/I_w は大きくなることが分かる。一方S波の場合、水膜下に形成される氷の厚さの増加に伴って I_u/I_w が増加する傾向を示すことが分かる。 80° の場合、反射光強度比 I_p/I_s が氷の表面状態の影響を受けにくいことが理論的にも明らかであることから⁽¹³⁾、とくにP波における I_u は水膜下の下地である氷の表面状態のいかんにかかわらず一定値となつたため、このような傾向が得られたと考えられる。

従って、水膜下の凍結路面の有無を判別するためには、入反射角度を 80° に設定し、表面下からの反射光と表面反射光との比を用いれば良いことが判明した。なお、P波によればその判別精度が高くなることも明らかとなつた。

4. 結論

本論文では、表面下の任意深さからの反射光を測定することによって、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判別手法の構築を試みた。

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. 入反射角度 60° に設定すると氷の表面状態の識別が可能となるが、表面状態が滑らかな氷と水膜の判別は困難である。
2. 入反射角度を 80° に設定し、表面下からの反射光と表面反射光との比を用いれば水膜下の凍結路面の有無を判別できることが判明した。なお、P波によればその判別精度が高くなることも明らかとなった。
3. 従って、本手法によって路面の滑りやすさを識別するためには、入反射角度 60° と 80° の二通りの測定を行うこと、 1500 nm を主測定波長とすれば良いことが明らかとなつた。

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) 古川義純：氷の表面は溶けている！：滑りやすさのメカニズム、日本機械学会誌, Vol. 112, No. 1086, p. 402-405(2009)
- (12) 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(第1報), 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 5, p. 931-936(2015)
- (13) 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(第2報), 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 5, p. 937-942(2015)
- (14) 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