

171-20145913 近赤外偏光分光計測による凍結路面の滑りやすさ解析*

岩間 大輔¹⁾ 北川 浩史²⁾ 城戸 章宏³⁾ 長沼 要⁴⁾

Measurement of Friction Coefficient of Icy Road Surface by Spectral Polarimetry

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. In this paper an NIR spectroscopic method was applied for the various roads whose surfaces were covered in ice. And the possibility to detect a road friction coefficient precisely by using around 1500 nm wavelength incident light at 60 degree reflection angle was obtained.

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

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る⁽²⁾。従って、スリップ事故防止のためには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ータイヤによる計測⁽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。これらの研究によってドライ、ウェット、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⁽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。

本研究は、車両から前方の路面のすべり摩擦係数 μ を非接触・高精度で測定することを最終目的としており、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)}。本論文ではこれまで以上の高精度計測手法の確立を目指して、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することを試みた。

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。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n₁およびn₂、入射角と反射角をθ₁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n₁は1、水および氷の屈折率n₂はそれぞれ1.3334および1.309である。

*2014年10月23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 (062-0922 札幌市豊平区中の島2条6丁目2-1)

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) 有限会社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。

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

なお、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_2 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。

$$\widehat{n}_2 = n_2 + i\kappa_2 \quad (5)$$

ここで、 κ_2 は消衰係数を表し、氷の表面状態に依存するものと考えられる。

図 2 は、式(4)を用いて水および氷の場合の I_p/I_s を入反射角 θ_1 に対して算出した結果である。水および氷の場合、いずれもブリュースタ角である約 53° で p 波の反射率がゼロとなるため、 I_p/I_s もゼロとなることが分かる。この場合の氷と水との差異は僅かであるが、氷のデータから水のデータを引いた値、 $\Delta I_p/I_s$ と入反射角度 θ_1 との関係について調べてみた。その結果を図 3 に示す。図によれば、氷と水との差が顕著となる角度は約 30° または約 80° であることが分かる。

本研究では、反射光の偏光強度比、すなわち I_p/I_s を用いることによって、氷の表面状態や水膜の有無について定量解析が可能か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 4 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ー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。

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

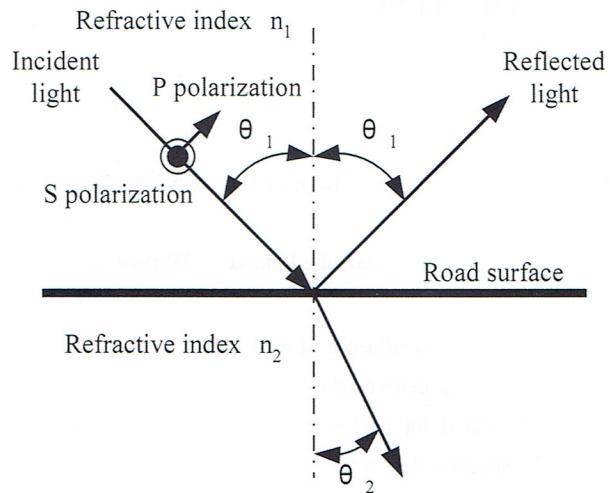


Fig. 1 Schematic of polarization and reflection

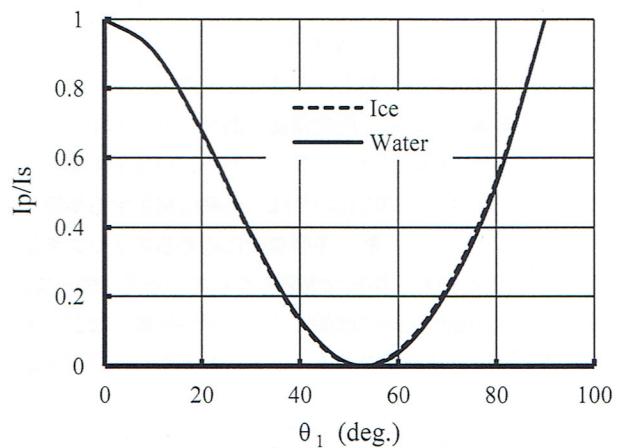


Fig. 2 Relation between I_p/I_s and θ_1 (Theoretical)

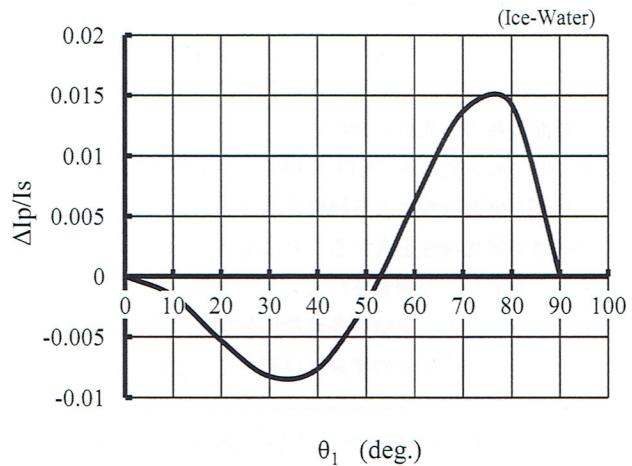


Fig. 3 Difference of I_p/I_s between ice and water, $\Delta I_p/I_s$ varied in reflection angle, θ_1 (Theoretical)

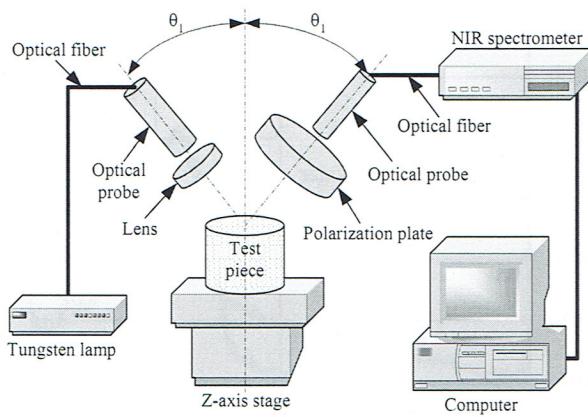


Fig. 4 Plan of the NIR Spectral Polarimetry system

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°Cの低温状態を保った。

ここで、各種サンドペーパーで研磨した氷盤の算術平均粗さの計算値 R_a と滑り摩擦係数 μ の実測値との関係について、以前の研究で得た結果を図 5 に示す⁽¹³⁾。図から、氷盤の μ は R_a と良好な相関関係にあることが確認されている。従って、実験データの解析においては、氷盤の表面状態を示す因子として、 R_a を用いることとした。

測定データの解析に際しては、反射光強度が微弱であることに起因する測定誤差を分散させるため、波長データサンプリング数 512 のうち、各波長データについてそれぞれの前後 50 データ、合計 100 データを平均化して使用した。

3. 実験結果および考察

3.1. 測定波長と計測精度

積雪寒冷地において、滑りやすい路面は主としてアスファルト路面上に降り積もった雪がタイヤによって踏み固められ、磨かれることによって形成される。特にブラックアイスバーインと呼ばれるアスファルト路面が透けて見えている状態の路面も実験の対象としなければならない。一方、地域によってアスファルト路面自体の表面状態(以下、下地と呼ぶ)も異なっているため、本計測手法におよぼす下地の影響について調査する必要がある。そこで、アクリル製シャーレの底にアスファルト路面を模擬した 5 種類のサンドペーパーを貼り付けたものと貼り付けないものの合計 6 種類の容器に対して、それぞれ 5 mm の水膜を形成し、これら下地の異なるテストピースに対して本手法の適用を試みた。その結果を図 6 に示す。

図によれば、各種下地の I_p/I_s は波長が短いほどばらつきが大きくなっているが、波長の増加に伴なって小さくなる傾向がみられる。この結果から水表面に近赤外光源を照射した場合、水表面の反射だけではなく下地からも反射しているということが分かる。なお、この場合の入反射角度は 60° に設定した。

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

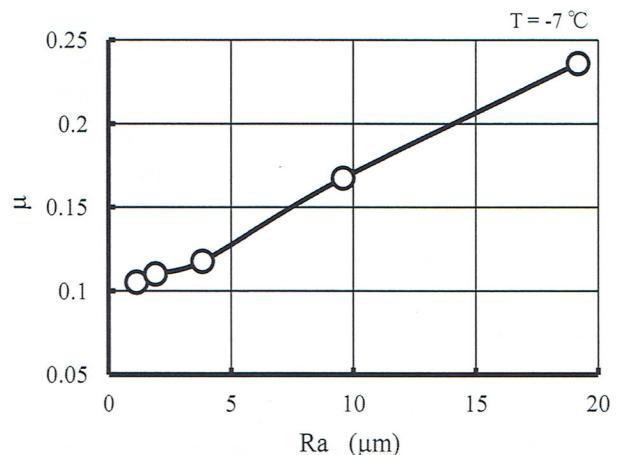


Fig. 5 Relation between arithmetic mean roughness, R_a and the road surface coefficient of friction, μ

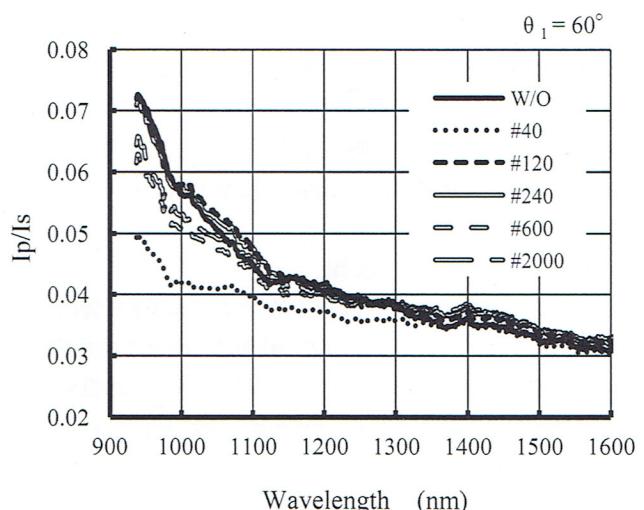


Fig. 6 I_p/I_s spectra from water surfaces covering mimic asphalts

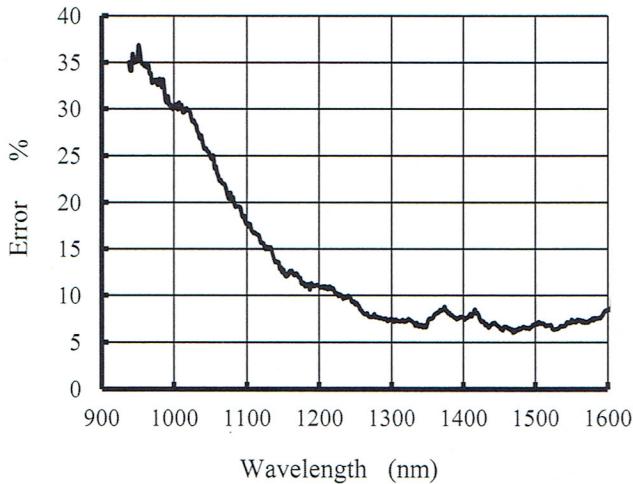


Fig. 7 Measurement error spectra of I_p/I_s

図6のデータを用いて、各波長における I_p/I_s の最大値と最小値との差を平均値で除した値を誤差と定義して算出した結果を図7に示す。図から、波長が 900~1000 nm 付近で誤差が 30%~35% と大きくなるが、波長の増加に伴なって誤差が小さくなり、1500 nm 付近では 6~7% まで低下することが分かる。

図8は氷および水の近赤外吸収スペクトルの計測結果である。この際の氷および水の厚さはいずれも 0.2 mm であり、表面温度はそれぞれ -5°C および 5°C である。図から、氷および水はいずれも 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、氷盤および水膜における反射スペクトルが 1500 nm 近辺の長波長域では、下地からの反射光は氷と水に吸収されるため、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って 1500 nm 付近の光は地表に到達しないため、本研究において太陽光は外乱とならない。

すなわち、本手法は測定波長を 1500 nm 付近に特定することによって精度の高い計測が可能となることが判明した。従って、以降の実験においては測定波長が 1500 nm の場合についてのみデータの解析を行った。

3.2. 入反射角度 θ_1 の影響

ここでは入反射角度 θ_1 が本計測手法に及ぼす影響について検討を試みた。最も滑りやすい路面は氷盤上に水膜が形成された路面であるので、まず図3に示した氷と水の識別に対する理論的考察が妥当かどうか、氷盤と水に対して θ_1 を変えた場合の各種 I_p/I_s を求めた。その結果を図9に示す。なお、この場合の氷盤には一例として 240 番のサンドペーパでサンディングしたものを用いた。図から、図3の場合と同様に、 θ_1 の減少に伴なって、水と比較して氷盤の I_p/I_s は小さくなるものの、 θ_1 が 45° 以上になると逆に大きくなる傾向を示

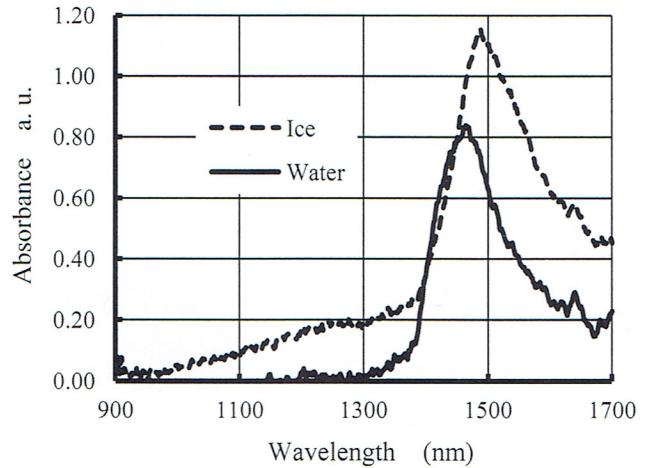


Fig. 8 NIR absorbance spectra of ice and water

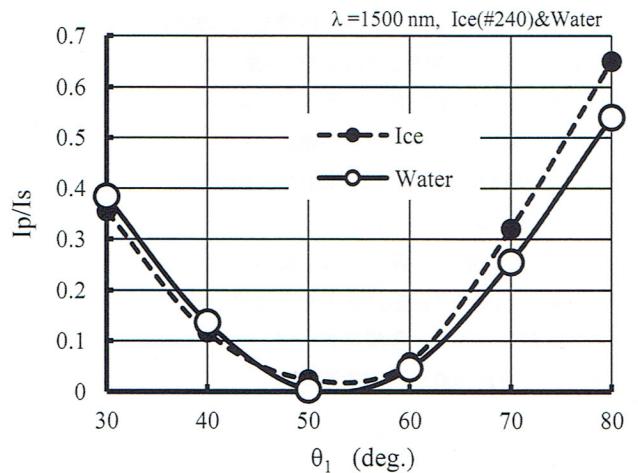


Fig. 9 Influence of reflection angle, θ_1 on measured I_p/I_s with water and ice

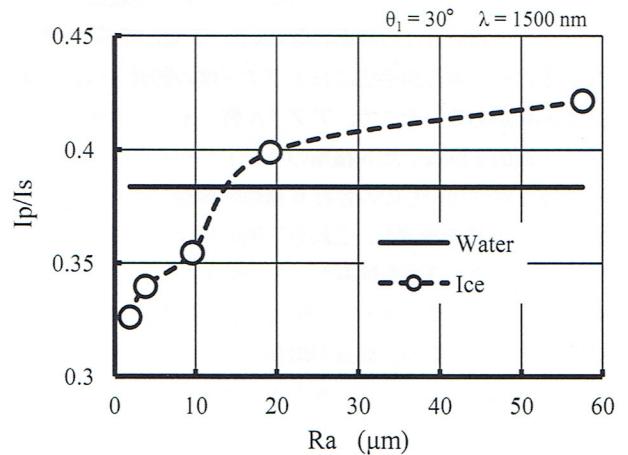


Fig. 10 Relation between I_p/I_s and R_a ($\theta_1 = 30^\circ$)

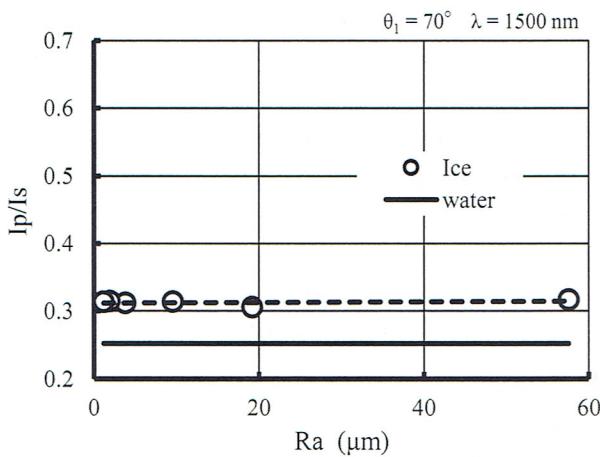


Fig. 11 Relation between Ip/Is and Ra ($\theta_1 = 70^\circ$)

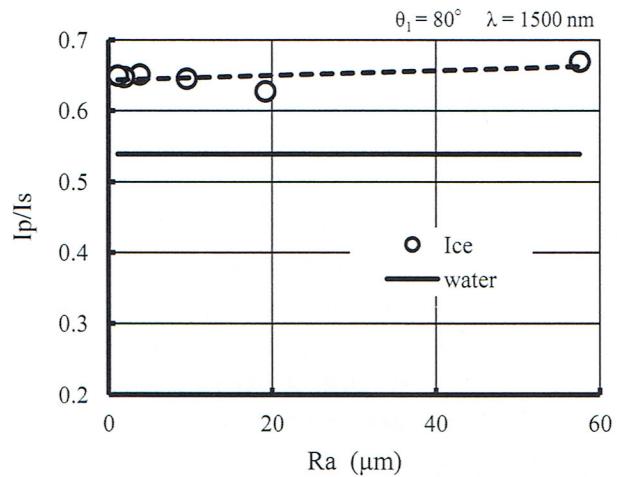


Fig. 12 Relation between Ip/Is and Ra ($\theta_1 = 80^\circ$)

すことが分かった。

次に θ_1 を 30° に設定し、40 番、120 番、240 番、600 番、1200 番のサンドペーパーでそれぞれ研磨した各種氷盤を用いて Ip/Is の特性を計測した。その結果を図 10 に示す。なお、図の横軸は算術平均粗さの計算値 Ra を示している。図から、 Ra の増加に伴なって、氷盤の Ip/Is は単調に増加する良好な相関関係を示すことがわかる。しかし、 Ra が 15 を超えると水膜の値よりも大きくなることから、 30° に設定した場合、氷盤と水膜との判別が困難となることが判明した。

さらに、 θ_1 を 70° および 80° に設定した場合の結果を図 11 および 12 に示す。図から、いずれの角度においても Ra のいかんにかかわらず、氷盤の Ip/Is は水膜よりも大きな値を示し、その傾向は 80° において著しいことが分かる。一方、氷盤の Ip/Is は Ra に対する感度を有しないことも明らかとなった。

3.3. θ_1 が 60° の場合における各種路面の Ip/Is
 θ_1 を 60° に設定した場合の実験結果を図 13 に示す。図から、 Ip/Is はアスファルトの場合 0.5 を超えているのに対して、 Ra が約 $60 \mu\text{m}$ の粗い氷盤においても 0.2 付近の値を示し、アスファルト路面との識別が容易であることが分かる。一方、 Ra の減少に伴なって Ip/Is は直線的に減少し、水の値に漸近することも明らかである。

従って、本研究の範囲では、入反射角度 θ_1 を 60° に設定し、主として測定波長 1500 nm における Ip/Is を計測することによって、路面の算術平均粗さ Ra が決定でき、さらに路面の滑り摩擦係数 μ を高精度で推定することが可能になった。また、 $\theta_1 = 70^\circ$ あるいは 80° を併用することで、氷盤と水膜との高感度の識別も可能となることが明らかとなった。

4. 結 論

本研究では各種路面における近赤外光表面反射の偏光特性に着目し、これによる路面の滑り摩擦係数 μ の非接触計測の

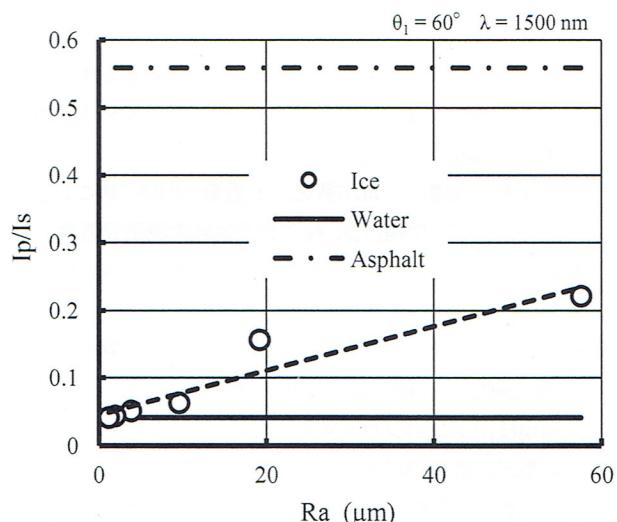


Fig. 13 Relation between Ip/Is and Ra ($\theta_1 = 60^\circ$)

可能性について検討した。

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. 偏光の方向が入反射面に平行な成分である p 波とそれに垂直な成分である s 波との反射光強度比、 Ip/Is による近赤外偏光分光計測によって、凍結路面の滑りやすさの非接触定量計測が可能となった。
2. 水と氷における光の吸収バンドはいずれも 1500 nm 近傍にあることから、 1500 nm 付近の波長を使用すると、太陽光による外乱と下地である路面の影響を除外した精度の高い計測が可能となる。
3. 理論計算の結果、光の入反射角度 θ_1 が 30° および 80° 付近で氷と水との判別がしやすくなる。

4. θ_1 を 30° に設定すると、反射光強度比 I_p/I_s は氷盤の算術平均粗さの計算値 R_a に対して良好な相関関係を示すものの、氷盤の表面状態によっては水膜との判別が不可能となる。
 5. θ_1 を 70° あるいは 80° に設定すると、いずれの角度においても R_a のいかんにかかわらず、氷盤の I_p/I_s は水膜よりも大きくなるため、水膜との識別が可能となるのに対して、 R_a に対する感度が消失する。
 6. θ_1 が 60° の場合、 I_p/I_s はアスファルトにおいては 0.5 以上であるが、氷盤の場合、その値は 0.5 を大きく下回り、 R_a の減少に伴なって直線的に減少すると同時に水の値に漸近する。
- (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) 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

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、自動車技術会秋季大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. Pykkonen, 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、自動車技術会春季学術講演会前刷集、No. 58-14, p. 13-18(2014)