

試料表面における双方向反射特性の検討

環境リモートセンシング研究室 佐野真
指導教員 力丸厚 入江博樹 坂田健太

1.はじめに

夜間走行中の運転席から路面を見ると、路面が乾いている場合は、ライトによる照明は効果があるが、濡れている場合はライトで照明しても、鏡面反射となり路面が明るく見えにくい。従来より、路面状態の検出に関する基礎的研究が行われている¹⁾²⁾。これは実際の路面の状態を変化させて反射特性を計測するものもあり、対象の粒径が考慮されていない。路面の表面粒径が変化することでも反射特性に変化が生じることが考えられる。

2.研究目的

本研究では、表面粒径等の異なる試料ごとに反射特性を計測し、表面粒径が変化することで反射特性にどのような変化が生じるのかを検討することとした。

具体的には、素材表面の双方向反射率分布関数(BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)および偏光特性を計測し、湿潤条件や凍結条件などで、それぞれの反射角にどのような特徴が表れるか、異なる粒径の試料で比較するための基礎実験を行なった。

3.研究フロー

研究フロー図を以下の図1に示す。

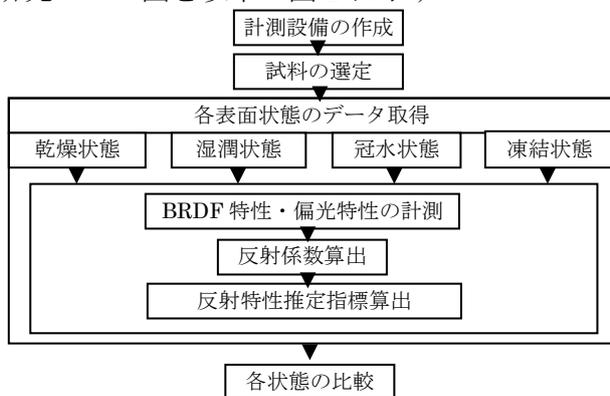


図1 研究フロー

4.光の反射成分

4.1 鏡面反射成分と拡散反射成分

鏡面反射成分は、入射光が空気中を通過して最初に到達した素材表面で反射された光であり、素材内部には侵入しない。反射した光は正反射方向に強い反射成分を示し、入射角と反射角が反射面に対して同じ角度となる時、鏡面反射成分は強まる。これを図2のように $\theta_i = \theta_r$ と表される。

これに対して拡散反射成分は、光源からの入射光が素材内部に侵入し、内部で吸収・反射・透過を繰り返す間に素材の透過率・反射率に応じた分光特性を反映するものである。表面の非常に細かい凹凸によって光が全方向に散乱される反射で、図3のような状態となる。

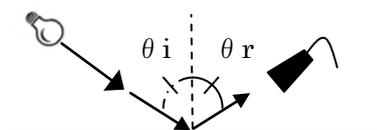


図2 鏡面反射現象

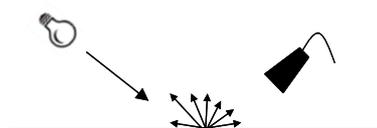


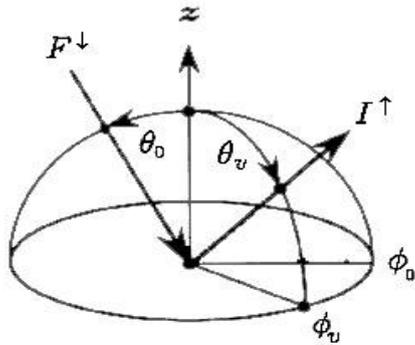
図3 拡散反射現象

鏡面反射と拡散反射が見られる対象物の違いとして、対象物の表面粗度・材質等の違いがあげられる。艶のある材質のものは鏡面反射成分が強まり、そうでないものは弱くなる。

4.2 双方向反射率分布関数

一般的な物体の反射は、光源と物体、物体と分光放射計の幾何学的な位置関係によって、明るくなったり暗くなったりする性質や、素材表面に鏡面反射のハイライトが現れる性質を持

っている。このような性質は双方向反射率分布関数または **BRDF** と呼ばれ、ある角度で物体に入射する放射が、物体と空気の境界面からある角度に反射される割合として定義される。**BRDF** の概念図を図 4 に示す。



F^\downarrow : 下向き放射の直達光成分
 I^\uparrow : 物体から反射した上向き放射輝度(反射光)
 θ_o, ϕ_o : 入射角, 方位角
 θ_v, ϕ_v : 反射角, 方位角

図 4 BRDF の概念図

4.3 偏光特性

電界ベクトルが入射面内で振動する光の成分を **p** 偏光, 電界ベクトルが入射面に垂直に振動する光の成分を **s** 偏光と呼ぶ。

s 偏光の方が **p** 偏光よりも反射率が大きいいため、界面からの反射光は一般に **s** 偏光を多く含む光となる。そして **s** 偏光, **p** 偏光成分を含む光がガラス表面に入射すると、反射光は完全に **s** 偏光のみとなる。偏光フィルタを使用し、水平方位の偏光子を通してこれを見ると、**s** 偏光はカットされた状態で見える。

各素材表面によって **BRDF** 特性には違いがあり、本研究では異なる材質・粗度を持つ試料に光を照射させた時の **BRDF** 特性を偏光特性とともに計測することによって、表面粒径が変化することで反射特性にどういった変化が生じるかを検討することとした。

5. 実験概要

屋内実験にて再現性のある双方向反射計測

をするべく計測設備の作成・配置を行なった。対象とする試料は表面粒径が異なるものを用いた。

本研究では **BRDF** 特性を考える上で、方位角については考慮せず、立面上で入射角, 反射角を変化させて試料の反射特性を計測していくものとした。

5.1 計測設備の作成及び配置

光源と分光計の受光部(プローブ)の位置関係については、図 5 で示す入射角・反射角にそれぞれ配置して計測するものとした。また、実際の計測設備の写真を図 6 に示す。

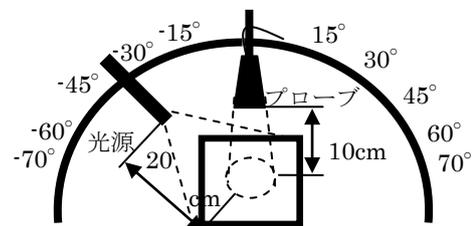


図 5 実験設備の配置図

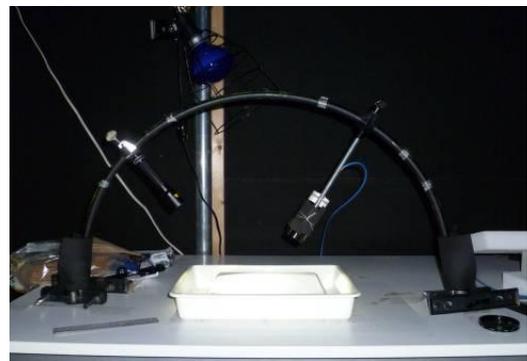


図 6 実際の計測設備

5.2 計測・解析方法

(1)BRDF 特性計測

光源とプローブの配置について、光源は図 5 において入射角 $-45^\circ, -70^\circ$ の 2 箇所を設置し、それぞれの角度において、計測可能な角度で **BRDF** 特性及び偏光特性を計測した。ただし、陰などの影響で計測不可能な位置についてはやむを得ず計測は行わないものとした。

(2)偏光特性計測

偏光特性はプローブに偏光フィルタを取り

付け、格子角度を変えて、計測するものとした。また、偏光フィルタの有無、格子角度を「偏光計測なし」「垂直偏光遮断」「水平偏光遮断」の3種に設定し、計測を行った。

6. 試料の選定

試料は粒径が異なるものを選定した。各試料とも高さは25 mmである。BRDF特性・偏光特性を計測した試料を以下の図7に示す。

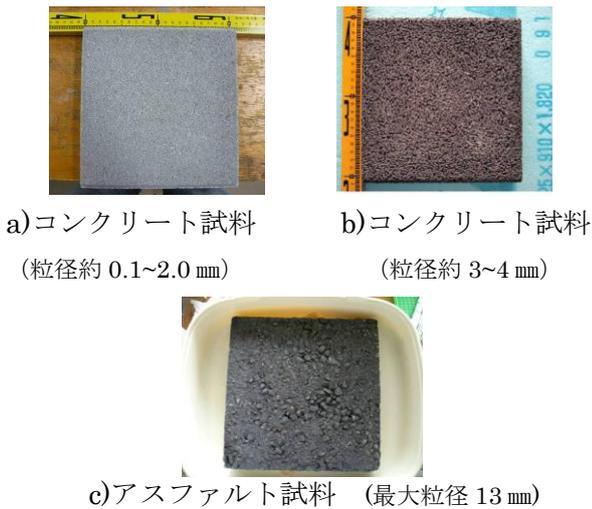


図7 計測対象試料

各試料において乾燥・湿潤・冠水・凍結状態の反射特性を計測するものとした。また、凍結状態については2種の設定条件を設けた。各状態の設定条件を表1に示す。

表1 各表面状態の設定条件

表面状態	設定条件
乾燥	試料表面を自然乾燥
湿潤	試料より水深が 50 mm 低くなるように設定
冠水	試料より水深が 50 mm 高くなるように設定
凍結①	粒子の隙間に氷が張った状態
凍結②	表面全体に氷が張った状態

7. 計測結果

結果は各試料において計測した光源の角度

ごとに表し、入射角・反射角に対応するようレーダーチャートに表示した。コンクリート試料粒径 0.1~2.0 mm を例とし、計測結果を図8に示す。電球マーク、矢印は入射角を示している。

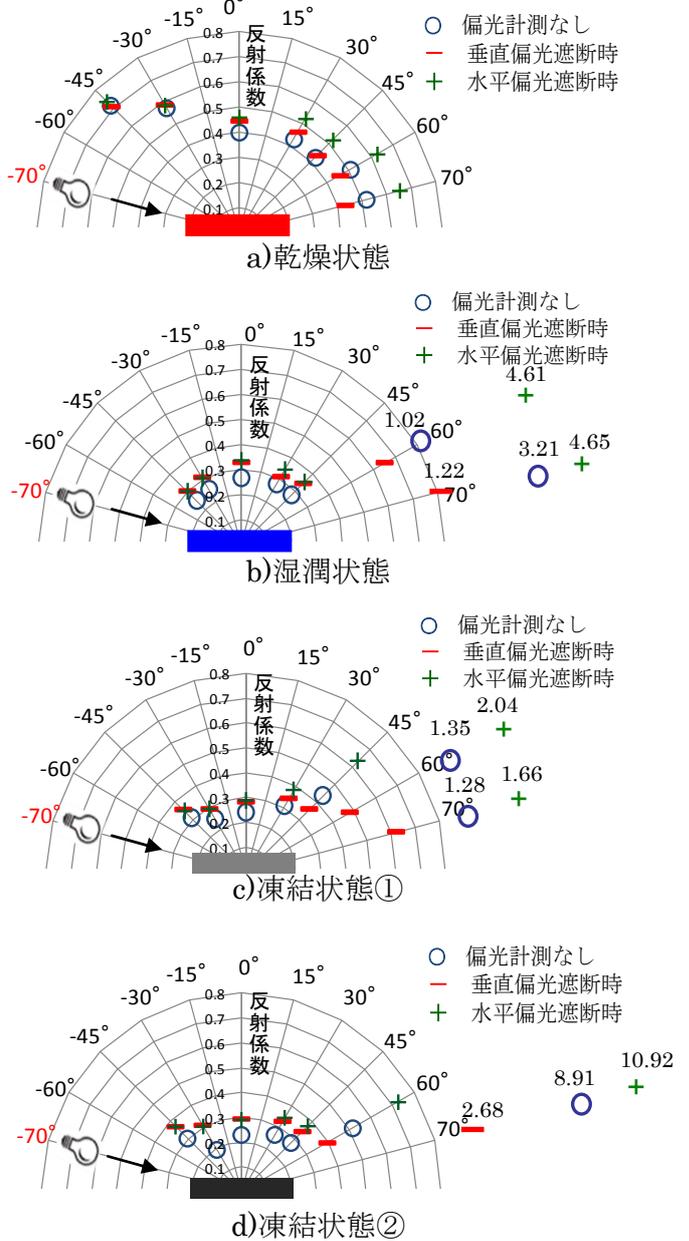


図8 コンクリート試料粒径 0.1~2.0 mm の各表面状態における反射係数計測結果

乾燥状態の計測結果はマイナス方向への反射が強く出ているのに対し、他の状態については反射特性が鏡面反射モデルとなり、マイナス方向の反射係数が弱まり、プラス方向への反射が強く出た。特に反射角+60°、+70°について

ては他の反射角に比べて著しく大きな反射係数を示した。また、試料表面状態が変化し、プラス方向の反射係数が大きくなるに従い、垂直偏光遮断時と水平偏光遮断時の反射係数の差が大きくなる。

8. 反射特性推定指標の算出と各試料間の比較

8.1 偏光指標

各試料及び表面状態の垂直偏光遮断時・水平偏光遮断時のフィルタ状態で取得した反射係数と、それらと同一の反射角における偏光なし時の反射係数との比を偏光指標（PI）とした。計算式を式(1)に示す。この指標の垂直偏光遮断時と水平偏光遮断時の指標値の差分が大きいほど偏光性が大きいと定義する。PIの算出結果の例を図9に示す。

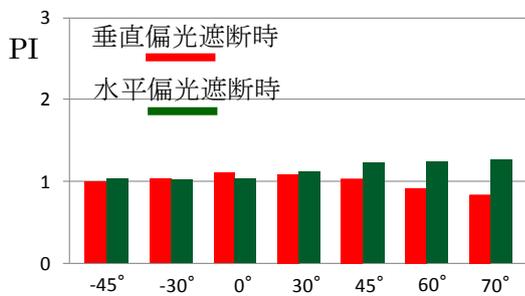
$$PI = \frac{Rh}{R} \theta, \quad \frac{Rv}{R} \theta \dots (1)$$

Rh : 垂直偏光遮断時の反射係数

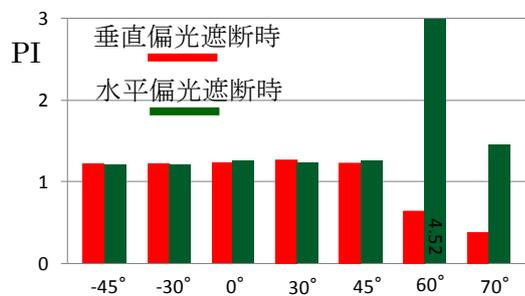
Rv : 水平偏光遮断時の反射係数

R : 偏光なし時の反射係数

θ : $-45^\circ, -30^\circ, 0^\circ, +30^\circ, +45^\circ, +60^\circ, +70^\circ$

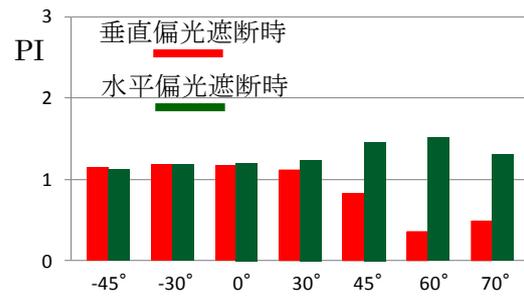


a) 乾燥状態

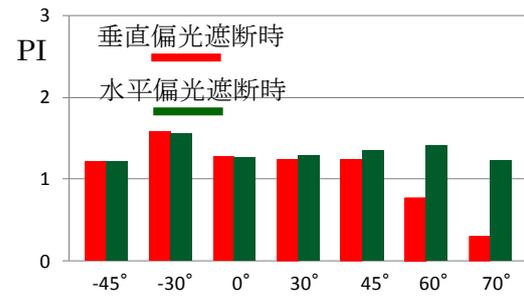


b) 湿潤状態

図9 コンクリート試料粒径 0.1~2.0 mmにおける入射角 -70° 、反射角 $+70^\circ$ の偏光指標算出結果



c) 凍結状態①



d) 凍結状態②

図9 コンクリート試料粒径 0.1~2.0 mmにおける入射角 -70° 、反射角 $+70^\circ$ の偏光指標算出結果

図9から、どの表面状態においても鏡面反射が起きている反射角 $+70^\circ$ の角度に近づくにつれ、偏光性が高くなっていることが確認できる。図8の各表面状態における反射係数計測結果と合わせると、表面状態が乾燥状態から各状態に変化し鏡面反射成分が強くなり反射係数が大きくなるに伴い、高い偏光性を示すことがグラフから見て取れる。また、どの表面状態においてもマイナス方向の反射角についてはほとんど偏光性が確認できなかった。

8.2 BRDF 特性推定指標

入射角 -70° において、各正反射方向の反射係数と反射角 -45° の反射係数の比率を取り、BRDF 特性推定指標（BI）とした。この指標は各表面状態にて、マイナス方向への照り返しが強い特性なのか、またはプラス方向への鏡面反射が強い特性なのかを確認するための指標である。計算式を式(2)に示す。また、各試料において反射角 $+70^\circ$ で最も特徴が大きかったため、この角度にて各試料の比較を行なうこととし

た．算出した結果を各試料間で比較したグラフを図 10 に示す．

$$BI = \frac{R_{\theta}}{R_{-45^{\circ}}} \quad \dots \dots (2)$$

R : 偏光なし時の反射係数

θ : $+30^{\circ}$, $+45^{\circ}$, $+60^{\circ}$, $+70^{\circ}$

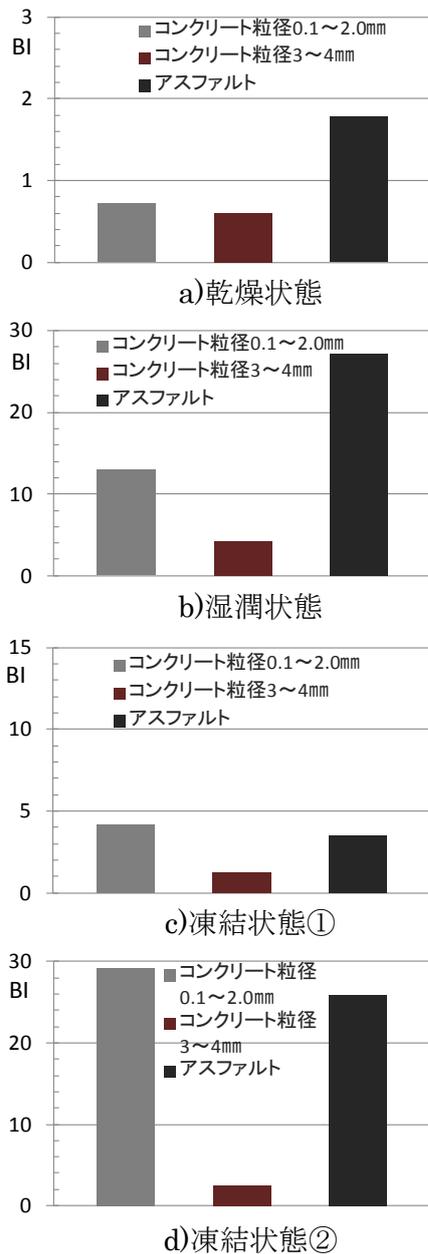


図 10 入射角 -70° , 反射角 $+70^{\circ}$ 時の各表面状態における BI の各試料間での比較

乾燥状態においてアスファルト試料以外は指標値が低くなり値が 1 を下回った．これはマ

イナス方向への反射が強いためである．各状態に変化させた際，コンクリート試料粒径 $0.1\sim 2.0\text{ mm}$ とアスファルト試料は鏡面反射が強くなり，指標値が凍結状態①で 3 以上，湿潤状態，凍結状態②で 10 以上と高く出た．つまり，状態変化させたことによりマイナス方向と比べてプラス方向への光の反射が 3~10 倍になったことがこの指標からわかった．一方コンクリート試料粒径 $3\sim 4\text{ mm}$ についてはどの表面状態においても他の試料と比べ指標値が低く出た．最も大きな湿潤状態でさえ，指標値は 4 程度と他の試料に比べ低かった．これは粒径が大きいことで，試料が水を吸収しやすいことや，表面に厚い氷が張りにくいことで鏡面反射成分が小さくなったことが要因としてあげられる．

8.3 表面状態変化指標

乾燥状態時の反射係数と表面を各状態に変化させた時の反射係数との比を取り表面状態変化指標 (SI) とした．SI は乾燥状態から各表面状態に変化させた時の反射特性の変化を確認する指標である．計算式を(3)に示し，算出した結果を各試料間で比較したグラフを図 11 に示す．図 11 の a) にマイナス方向の変化を比較するために反射角 -45° 時の算出結果を示し，b) に各試料とも最も反射係数の特徴が著しかった反射角 $+70^{\circ}$ 時の算出結果を示す．

$$SI = \frac{R_x}{R_d} \quad \dots \dots (3)$$

R_d : 乾燥状態における各反射角の偏光なし時の反射係数

R : 各反射角の偏光なし時の反射係数

x : wet, freeze①, freeze②

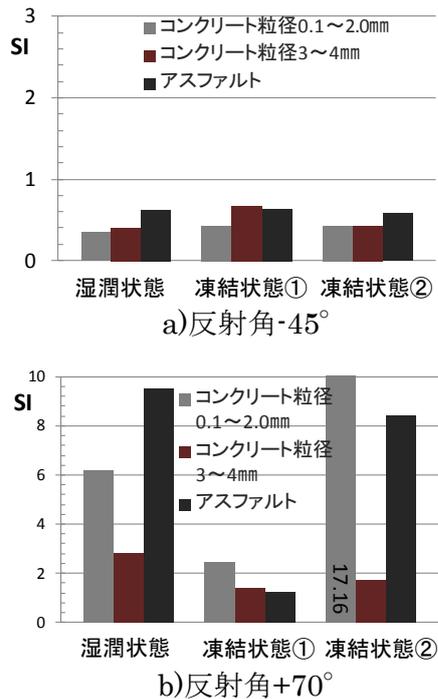


図 11 入射角-70° 時の各表面状態における SI の各試料間での比較

反射角-45° 時は試料間で反射特性に目立った変化は見られなかった。このことからマイナス方向の反射光は試料の表面性状によらずほぼ一定であることが言える。また、SI が 1/2 前後であることから、各状態におけるマイナス方向への光の反射は乾燥状態の 1/2 倍の強さとなることがこの角度の SI の結果においては言える。

反射角+70° 時において、コンクリート試料粒径 3~4 mm は BI と同様、指標値が他の試料と比べて小さかった。これは先にも述べたように粒径が大きいことにより試料が水を吸収しやすいことや、表面に厚い氷が張りにくいことが要因としてあげられる。これにより鏡面反射成分が大きくならなかつたと推測する。

9.まとめ

- 試料表面状態が乾燥状態時は拡散反射を示し、それ以外では鏡面反射成分が強くなることが確認できた。PI を評価した結果、鏡面反射が起きるような角度で偏光性も大きくなる

ことが確認できた。また、後方側の角度では偏光特性による効果が出ず、試料間でそれほど大きな特徴も出なかった。

- 鏡面反射が起きる角度で試料間で反射特性に特徴が表れた。今回の角度条件でいえば入射角-70°，反射角+70° の角度で最も各試料の特徴が表れた。BI・SI を評価した結果、粒径の違いによる特徴の 1 つとして状態変化させた時の光の反射が著しく他の試料と比べ低い試料が存在した。これは試料の表面粒径が影響し、粒子の隙間に水が吸収されることや、氷の厚さが変わってくるなどの間接的な効果が表れたことが要因であると推測できる。
- 今回の計測データを実路面に置き換えると、車両のヘッドライトが反射面である路面に入射し、ドライバーに戻ってくる反射光(マイナス方向の反射光)は路面が乾燥状態の場合とその他の状態とで角度によっては反射の強さがほぼ半減することが推測できる。また、理想的な車のヘッドライトとドライバーへの反射光の照り返しを考慮するのであれば、より浅い角度での入射光を用いた反射特性計測を可能とする設備を用意する必要がある。

参考文献

- 1) 斉藤祐紀, 内田暁, 大谷義彦, 穂積順一, 石原成浩, 藤波研次: 画像による路面状態の検出に関する基礎的研究, 電気関係学会東海支部連合大会講演論文集 O-378, 2006
- 2) 高橋健一, 門馬英一郎, 松村太陽, 石井弘允, 小野隆, 穂積順一: 偏光光源の反射特性を利用した路面状態の判別に関する基礎研究, 日本大学理工学部学術講演会予稿集, L-24, 巻 54th, 2010