

路面状態センサ

Road Surface Sensor

藤村 契二⁽¹⁾ 坂本 隆⁽²⁾
Keiji Fujimura Takashi Sakamoto

要 旨

自動車の走行環境を検出するセンサの一つとして、近赤外光を利用した路面状態センサを提案する。

原理は、発光素子と受光素子を入射角及び反射角がブリュースタ角となるよう設定したとき得られる偏光特性を利用したものである。すなわち、湿潤路面は鏡面反射、乾燥路面は拡散反射の傾向をもっており、前者では平行偏光特性が強調され、後者ではほとんど偏光特性が現われないことを利用している。

製作したセンサにより、各種路面で評価試験を行った結果、乾燥・湿潤・凍結・圧雪等の路面を90%以上の確率で判別できることが確認できた。

今後、ブレーキ制御あるいはドライバへの警報用センサ等としての展開が期待される。

We propose a road surface sensor using a near infrared beam as one of useful sensors for vehicle control. The principle is based on the reflection flux polarization when a light source and a detector are set in the Brewster's angle respectively. This means that the light flux reflected from a specular surface, e.g. completely wet surface is horizontally polarized whereas the light flux reflected from a diffused surface, e.g. completely dry surface is almost unpolarized.

After testing a developed model under several typical road surface conditions, we are confident that the dry, wet, frozen and snow-covered surfaces are able to be classified with the probability of more than 90%.

We expect that this sensor will be applicable for a brake controll system, driver's safty information system and so on in near future.

(1), (2) モートロニクス技術部

1. はじめに

自動車の安全性を向上させるため多くの制御・警報システムが提案され、それに必要なセンサの開発も鋭意進められている。¹⁾ その中の一つとして光方式の路面状態センサを提案する。

路面状態の検知は、車の走行制御全般に関連しており、ブレーキ制御、ステアリング制御あるいは駆動制御等への幅広い応用展開が期待される。

さらにオンボードのみでなく道路情報システム道路保守管理システムへの応用も考えられる。

路面状態を光学的にみると、乾燥時は拡散反射が支配的であり、湿潤時は鏡面反射の傾向が強くなる。両者を判定するには、一般に、一地点の反射に対して複数の測定点が必要であるが、²⁾ この方式では装置が複雑となり、車載用としては不適當である。同時に、車載用としては、路面の凹凸および反射率の空間変動に影響されることなく、路面を瞬時に観測し、あらゆる環境に対し精度を維持することが要求される。

これらの問題点を解決するためには、できる限り簡素な構成、リアルタイムによる信号処理および相対値演算による判定等が要求される。

一つの解決策として、我々は、発光素子と受光素子を入射角および反射角がブリュースタ角(Brewster's angle)となるよう設定したとき得られる反射の偏光特性に着目した。すなわち、この構成により、湿潤路面では鏡面反射により偏光度が1に近くなり、乾燥路面では拡散反射により、それがゼロに近づくことより路面状態判定が可能となる。

製作にあたっては、まず、外来光の影響を低減するため、発光源には近赤外LEDを用い、パルス変調光とした。また、路面上の同一視野の垂直・平行偏光反射成分を同時に観測するため、受光部にプリズム付レンズを用いて像を2分割し、各

々の光路に直線偏光素子を挿入した。偏光度は両出力の相対値から算出し、各種路面における反射レベルの変動に対し、その影響を少くした。

製作したセンサにより、各種路面で評価試験を行った結果、乾燥・湿潤・凍結・圧雪路面を90%以上の確率で判定できることが実証できた。

以下、本センサの概要および評価試験結果について記述する。

2. 開発のねらい

開発着手に当たり、この種のセンサがどのような用途に使い、どの程度の性能が要求されるのかを検討した。

まず、アンチスキッド制御装置(Anti-skid control system)においては、路面状態とブレーキ油圧は走行安定性に大きな影響を与える。特許公報等で、路面のすべり摩擦係数の情報を導入したアンチスキッド制御装置もいくつか、提案されている。^{3), 4)} しかし、この中で述べられている方法

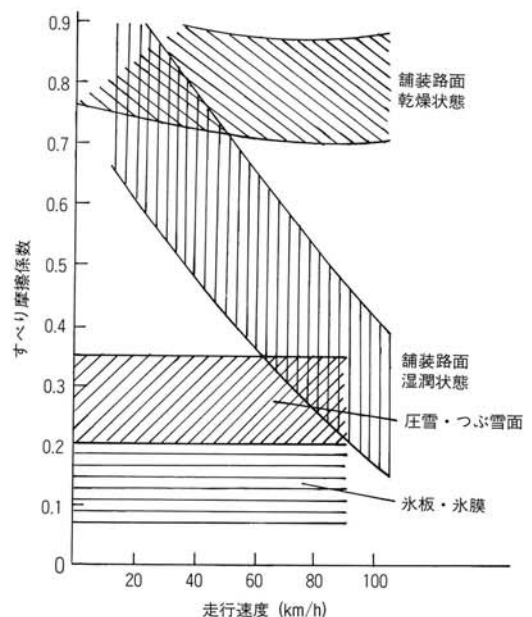


図-1 路面状態とすべり摩擦係数(建設省土木研究所)
Fig. 1 Relationship between road surface conditions and coefficient of friction.

表-1 路面状態センサの応用範囲

応 用 シ ス テ ム	内 容
1. アンチスキッドシステム	路面のすべり摩擦係数に応じたブレーキ制御が可能となり、より安全性が高まる。
2. 衝突防止システム	前方車両との車間距離と相対速度をレーダで検出し、路面状態に応じてレーダブレーキ式を変化させ、ブレーキ制御等を行う。
3. 道路情報システム	高速道路の路肩などに広域にわたって設置し、ドライバに前方路面の状態をリアルタイムに表示して警告を与える。
4. 道路保守管理システム	同一路面の偏光特性を定期的に測定し、路面の劣化状態を診断する。

は、制動時の加速度変化に着目したものであり、どうしても制御遅れが生じてしまう。一方、路面状態とすべり摩擦係数との関係は、図-1のように⁵⁾変化する。また、路面の湿潤状態を鏡面係数という考え方でとらえ、湿潤度合が大きくなるに従ってすべり摩擦係数が低下してくることを実証した報告もある。⁶⁾さらに、雨の降り始めは、路面上の泥土成分が浮き上り、ボールベアリングのように作用し、特にすべり易い状態になるともいわれて

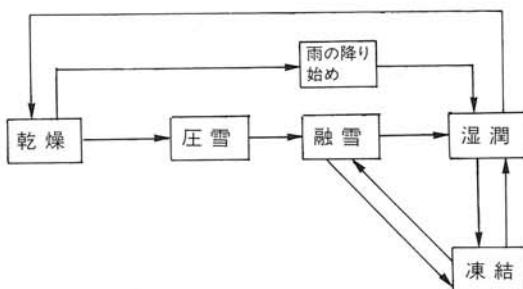


図-2 路面状態の遷移図

Fig. 2 Transition of road surface conditions.

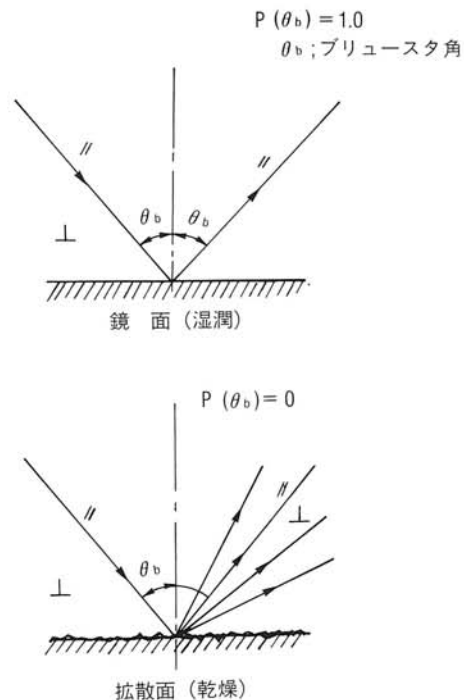


図-3 鏡面反射と拡散面反射

Fig. 3 A specular surface and diffused surface.

いる。⁵⁾このように、様々な路面の状態の検出、さらには、湿潤度合等の検出が事前にできれば、より安全に作動するアンチスキッド制御装置を提案できる。この他にも色々な応用を考えることができるが、表-1にとりまとめて示す。

そこで、ここで述べるセンサの性能を路面状態識別能力の面からとらえ、図-2に示す路面状態の遷移に着目し、実験・評価・検討を行った。

3. 測定原理

一般に、平面波の鏡面反射率 ρ は電磁波理論により、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \rho_h(\theta) &= \left| \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right|^2 \\ \rho_v(\theta) &= \left| \frac{n^2\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right|^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

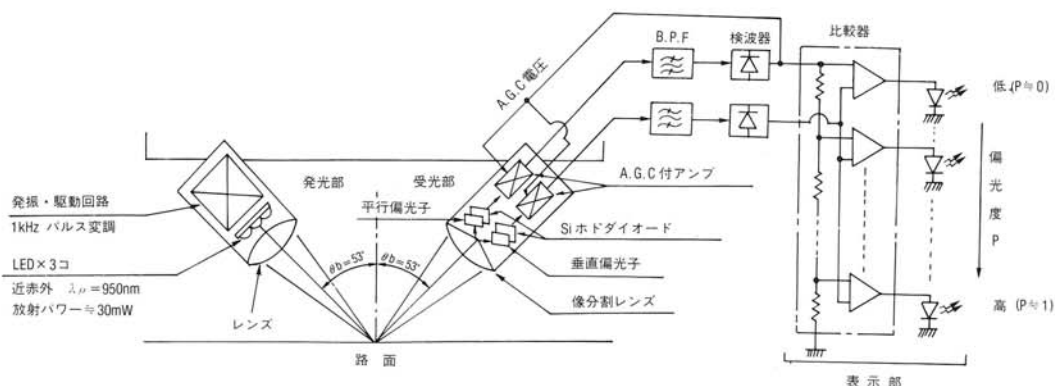


図-4 センサの構成

Fig. 4 Construction of a sensor.

ここで θ : 入射角

n : 両媒質の相対屈折率

$\rho_h(\theta)$: 反射の平行偏光成分

$\rho_v(\theta)$: 反射の垂直偏光成分

この時、 $\rho_v(\theta) = 0$ となる入射角が存在し、ブリュースタ角と呼ばれる。ここでは、 θ_b と記す。

一方、反射の偏光特性を表わす量として、偏光度 P が次式により定義されている。

$$P(\theta) = \left| \frac{\rho_h(\theta) - \rho_v(\theta)}{\rho_h(\theta) + \rho_v(\theta)} \right| \quad (2)$$

したがって、鏡面反射の場合、入射角 θ がブリュースタ角に等しい時 $P(\theta_b) = 1$ となり、他の入射角では、 $P(\theta) < 1$ となる。また、反射面が完全拡散面である時は、偏光特性を持たないため、 $\rho_h(\theta) = \rho_v(\theta)$ となり、受光角に関係なく $P = 0$ となる。すなわち、入射角および受光角がブリュースタ角に等しい時、反射面状態による偏光度の変化が最も大きくなる。鏡面から拡散面まで変化した場合、偏光度 P は 1 から 0 の間で変化する、 P を測定することによって、反射面の特性を知ることができる。

図-3に示すように、路面を光学的に大別すると乾燥時は拡散反射、湿潤時は鏡面反射が支配的であるため、偏光度 $P(\theta)$ の変化から路面の状態を推定することが可能となる。

4. センサの構成

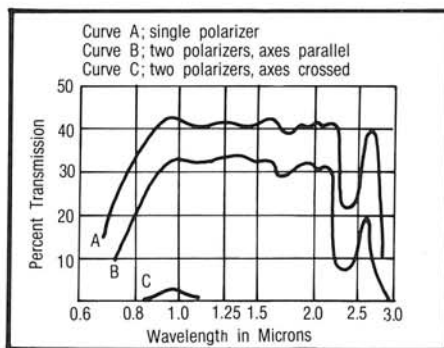
試作したセンサの構成を図-4に、また主要諸元を表-2に示す。

発光部は近赤外LEDを使用し、変調周波数 1 kHzでパルス変調して、太陽光やヘッドライト等の外乱光との識別を容易にしている。発光された放射光束は集光レンズにより、ほぼ平行光束として路面上に照射される。受光部には像分割レンズ(平凸レンズとプリズムとの組合せレンズ)を使用し、路面上の同一視野を2分割して各受光素子に結像する。受光素子の前面には直線偏光子を互に直交するように配置し、平行偏光成分と垂直偏光成分を同時に受光できるようにしている。偏光子には、ポラロイド社製HRタイプの近赤外用直線偏光子を用いている。液晶ディスプレイ等に用いられる可視光用の偏光子も何種類か試してみたが、近赤外域で十分な消光比が得られたのは、このHRタイプだけであった。図-5に使用した偏光子の特性を示す。

本センサは路面の様々な状況変化をオンボードで検出するため、平行偏光成分と垂直偏光成分を同時に検出することを特徴としている。そのため2系統の検出特性をできるだけ等しくすることが、検出精度の面から要求される。検出特性のばらつきは主に、①受光素子感度 ②像分割レンズ

表-2 センサの諸元表

項 目	諸 元
センサ取付位置	フロントバンパ内 (取付高さ≒400mm)
路面上検知エリア	50×70mm ² (受発光部のクロスエリア)
寸 法	φ40×90mm
重 量	175g
発 光 素 子	GaAs LED ($\lambda_p=950\text{nm}$)×3コ
発 光 出 力	≒30mW
変調周波数	1 kHz (方形波)
集光レンズ	口径 30mm 焦点距離 60mm 凸レンズ
寸 法	φ40×110mm
重 量	210g
受 光 素 子	Siホトセル (受光面積 10×10mm ²)
偏 光 子	近赤外用直線偏光子 (ポラロイド社 HRタイプ)
プリアンプゲイン	60 dB
A.G.C範囲	20 dB
周波数特性	$f_0=1.0\text{ kHz}$ $Q\approx 10$
像分割レンズ	口径 30mm 焦点距離 60mm 凸レンズ+頂角152°プリズム
表 示 部	LED12点 バークグラフにより 偏光比 ($K=\rho_h/\rho_v$) を表示



HR-An infrared light polarizer which covers most of the useful response range of commercial lead sulfide photocells.

図-5 近赤外用直線偏光子の特性
(ポラロイド社 HRタイプ)

Fig. 5 Characteristics of a near infrared linear polarizer. (Polaroid CO. HR Type)



図-6 センサの内部構造

Fig. 6 Inner configuration of a sensor.

による結像バランス（プリズム精度とレンズの球面収差によって決定される）③電気回路特性等によって発生する。このうち、電気回路特性を調整することにより、センサ組立後、検出特性を以下のように調整する。

まず、拡散面として800番程度のサンドペーパーを用い、両方の検波出力が同一となるようにする。次に、水面を観測し、両偏光成分の比が最大となるようプリアンプおよび検波器の特性を調整する。以上の調整を数度繰返すことにより、検出誤差を最少に抑えていく。

信号処理回路は両信号を比較する簡単なコンパレータでよく、センサの用途に応じて出力される。図-4の例は、偏光度すなわち路面の湿潤度をドット表示する場合を示している。平行・垂直偏



図-7 実車装着状態

Fig. 7 Installed model on a automobile.

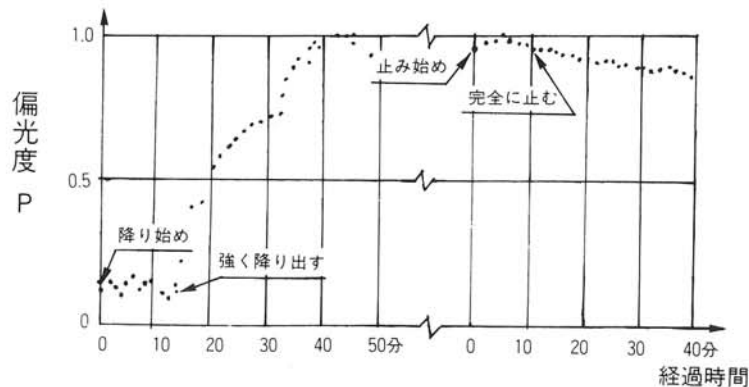


図-8 雨中の偏光度の経時変化

Fig. 8 Transition of a polarization degree in the rain.

光成分の比によって低偏光度 ($P \approx 0$) から高偏光度 ($P \approx 1$) まで表せることは、(2)式を次のように変形すればよくわかる。

$$P(K) = \left| \frac{K - 1}{K + 1} \right| \quad (3)$$

ここで、 $K = \rho_h / \rho_v$ (以後、偏光比と呼ぶ)

図-6は、試作したセンサの内部構造を示している。また、実際に自動車のフロントバンパに装着した例を図-7に示す。ブリュースタ角の関係か

ら、バンパの中に収納すると丁度都合がよい。

5. 評価結果

5.1 降雨時路面の観測

本センサの原理を確認するため、実車評価に先立ち、次に示す定点測定を行った。雨の降り始めから止んだ後の状態に至るまでの偏光度 P の経時変化を、実際のアスファルト路面で測定してみた。その結果を図-8に示す。降り始めてから偏光

表-3 各種路面状態の偏光度 (実車走行試験結果)

	乾 燥		湿 潤		凍 結・圧 雪		融 雪		走行速度 km/h
	$\overline{P_D}$	$\sigma/\overline{P_D}$	$\overline{P_W}$	$\sigma/\overline{P_W}$	$\overline{P_S}$	$\sigma/\overline{P_S}$	$\overline{P_S}$	$\sigma/\overline{P_S}$	
郊 外 舗 装 道 路	0.42	26%	0.91	0.54%	—	—	—	—	20
都 心 道 路 1	0.33	36%	0.89	0.38%	—	—	—	—	40~50
都 心 道 路 2	0.22	40%	0.89	0.55%	—	—	—	—	40~50
郊 外 幹 線 道 路	0.53	16%	0.89	0.21%	—	—	—	—	20
幹 線 国 道	0.40	20%	0.89	1.2%	—	—	—	—	40~50
都 市 高 速 道 路	0.39	17%	0.90	0.87%	—	—	—	—	50~60
北 海 道 山 間 部	—	—	—	—	0.10	32%	—	—	40
北 海 道 地方都市1	—	—	—	—	0.07	24%	—	—	20
北 海 道 地方都市2	—	—	—	—	—	—	0.84	40%	40
北 海 道 幹 線 道 路	—	—	—	—	—	—	0.92	13%	40

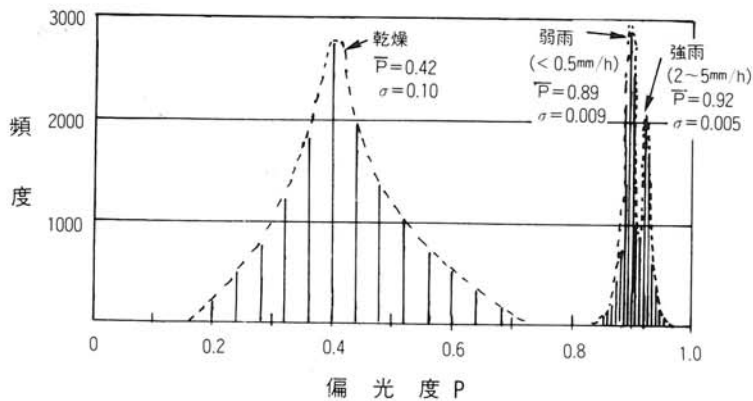


図-9 偏光度の分布

Fig. 9 Distribution of a polarization degree.

度 P の増加する様子、また雨が止んで路面が乾いてくるにしたがって偏光度が緩慢に低下している様子がよく示されている。すなわち、偏光度 P が路面の湿潤度をよく表わしているといえる。

これは、路面のくぼみに水滴が溜り、乾燥路面の拡散面が水滴によって、徐々に鏡面へ移行してゆくことを示すものと考察される。

5. 2 各種路面での実車試験結果

本センサを自動車のフロントバンパ付近に取付け、各種路面を走行して得られた偏光度のデータを表-3に示す。このデータを基に、以下、乾燥と

湿潤および凍結・圧雪と融雪路面の判定方法について考察する。

b) 圧雪路面 (偏光度 $\bar{P}=0.13$)
札幌花川付近a) 凍結路面 (偏光度 $\bar{P}=0.12$)
札幌中山峠付近c) 融雪路面 偏光度 $0.18 < P < 0.9$
札幌手稲付近

図-10 各種テスト路面の例

Fig. 10 Examples of a few typical tested roads.

面をいう。

さらに、表-3の道路のうち郊外舗装道路を例にとって、偏光度をヒストグラムで表わしてみると、図-9のようになる。これより、偏光度の分布は正規分布に近似でき、乾燥と湿潤路面を99.99%以上の判定確率で識別できることがわかる。

2) 凍結・圧雪および融雪路面の判定

寒冷地においては、図-10に示すような凍結、圧雪あるいは融雪路面が多く、北海道各地で測定したデータをまとめると図-11のようになる。このデータから、各路面の特徴として次のことがいえる。

- ① 融雪路面は当然、湿潤路面と同じ傾向を示すが、偏光比Kのばらつき範囲は湿潤路面よりも広い。
- ② 凍結、圧雪路面は乾燥路面よりもさらに偏光比が小さく、完全拡散面に近い。これは、スパイクタイヤ等により氷結表面が細かく削られているためと考察される。
- ③ 偏光比により、凍結・圧雪路面と乾燥路面を判定確率90%程度で判別できる。

3) 路面状態判別アルゴリズムの提案

以上の実験データに基づき、各種路面判別のための基本アルゴリズムを検討した。検討にあたって、以下の点に留意し、図-12に示すモデルを考えた。

- ① 融雪路面を識別するため、偏光比の時間的な変化傾向に着目した。
- ② 偏光比に加えて、外気温度の情報も取入れ湿潤と鏡面状凍結との識別を考慮した。なお、実車では鏡面状の凍結の観測例はなかったが、水溜りの凍結などがこの状態になることを確認している。
- ③ 雨の降り始めの検出は、偏光比の穏やかな増加傾向に着目した。

6. あとがき

反射の偏光特性を利用した車載用路面状態センサを開発し、乾燥、湿潤および寒冷地の凍結、圧雪などを正確に検出できることが実証できた。実用化までにはさらに ① 信頼性面の追求 ② 簡易な取付・調整方法の考案 ③ 応用システムと組合せた有効性の確認などまだまだ課題は多い。しかし、センサを構成している部品・材料の中には、将来的にネックになるようなものは見当らず、簡易な構造であるため、当センサの実用化に本質的な障害はないと考えている。

道路情報システム用途など、車載以外にも用途は広がっており、この種のセンサの実用化への期待は大きい。

最後に、このセンサの開発に終始ご助言、ご指導を賜りました滋賀大学板倉安正教授並びに、昨年惜しくもご逝去されました京都工芸繊維大学故堤 捨男教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 喜多 徹：『自動車用センサの動向』自動車技術、Vol. 40, pp. 183~188 (1986)
- 2) 佐藤 勉ほか：『路面凍結検知装置』、松下技報、Vol. 24, No. 3, pp. 526~536 (1978)
- 3) 公開特許公報：昭54-96674
- 4) 公開特許公報：昭55-44039
- 5) 藤原 武(監)：道路維持修繕ハンドブック、鹿島出版会、p. 245 (1976)
- 6) 芹沢 昭ほか：『道路照明における路面の反射特性と輝度』、照学誌、Vol. 51, No. 1 (1967)
- 7) M. Born et al: Principles of Optics (1980)
- 8) ポラロイド社カタログ：Polarized Light, p. 186 (1978)
- 9) 板倉安正ほか：『車両搭載用光学式路面湿潤

- 度センサー”、信学会宇航エレ研、SANE 79-33 (1979)
- 10) 板倉安正ほか：”反射の偏光特性を利用する車両搭載用路面湿潤状態検出センサー”、照学誌 Vol. 66, No. 10 (1982)
- 11) 竹鼻俊夫：”路面湿潤状態センサー” 偏光フィルム応用、(株)CMC (1986)