

(21) アンテナの近傍媒質応答を応用した 路面状態センシング

池田 一樹¹ 永島 和治² 幕内 雅巳²

1 正会員 日立製作所 研究開発グループ 回路システム研究部
(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292)
E-mail:kazuki.ikeda.ap@hitachi.com

2 非会員 日立製作所 研究開発グループ 回路システム研究部
(〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町 292)

自動走行車を実現する要素技術として、車両制動に影響する路面状態(乾燥/湿潤)のセンシングが必要である。これらの識別を目的に、車両下部に取り付けたアンテナの近傍媒質応答を応用する路面センサ方式を提案し、その実現可能性を検証した。その結果、マイクロストリップアンテナを用いたセンサの反射係数を閾値判定することで、センサ-路面間距離 80~120mm において舗装 2 種類(アスファルト/コンクリート)の路面状態(乾燥/湿潤)を識別でき、提案方式による車載型路面状態センサの実現見通しを得た。

Key Words: road condition, pavement, antenna, near-field, sensing

1. 緒言

道路交通の安全性と輸送効率向上のため、世界的に自動運転・自動走行技術の開発が加速している。日本・米国・欧州では、基本走行を人間の関与なく自動化できる技術の開発が進められている¹⁾。自動運転の実現には、運転者の感覚に替わって、各種センサにより運転に必要な情報の電子化が必須であり、車載カメラによる画像認識、レーダ・レーザによる測距を用いた自動ブレーキ技術が実現している²⁾。また、上記技術に加えて、降雨・積雪などの路面状態に応じた速度制御とブレーキ制御を実現するため、車載型路面状態センシング技術が必要である。

路面状態のセンシング方式として、画像認識³⁾、赤外線センサ⁴⁾、加速度センサ⁵⁾が報告されている。画像認識は、路面画像から路面状態を推定する方法であり、面的に把握できる特徴がある。しかし、撮像デバイスの制約によりトンネル出口や夜間街灯下の照度変化が大きい条件では識別困難である。赤外線センサは、水と氷の赤外線吸収スペクトル差異をもとに路面状態を識別するセンサであり、外来赤外線の遮光のため筐体が大型化する課題がある。加速度センサは、タイヤのすべり・振動を検出

して路面状態を推定する方式であり、タイヤ劣化や積載荷重変化によって検出精度の維持が難しいと思われる。そこで、本研究の目的は、外来光・車両状態の影響を受けず路面状態を識別するセンサの開発である。

本報告では、車両下部に取り付けたアンテナの近傍媒質応答を応用する路面状態センサを提案し、マイクロストリップアンテナとネットワークアナライザを用いた有効性検証結果について報告する。

2. センシング原理

外来光・車両状態の影響を受けずに路面状態をセンシングする方法として、近傍媒質によりアンテナの反射係数が変化する現象を応用する方式を提案する。本方式を用いたセンサとして、スノーセンサ⁶⁾、土壌媒質定数センサ⁷⁾が報告されている。ただし、これら従来方式は、アンテナと媒質を接触または極近傍($\leq 10\text{mm}$)に配置することを前提としており、車載条件となる普通自動車の最低地上高($\geq 90\text{mm}$)⁸⁾を実現できない。

提案方式の特徴をアンテナの電界強度分布に基づいて述べる。基礎的アンテナである微小ダイポールアンテナ

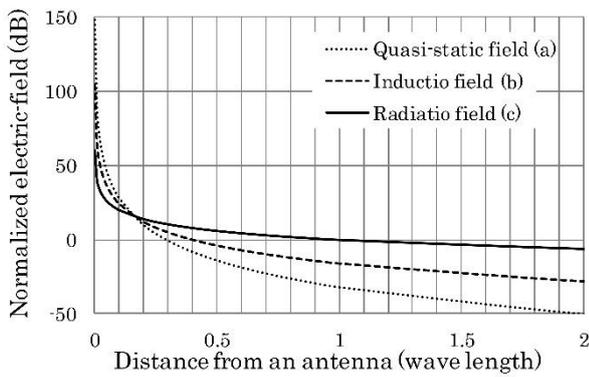


図-1 電界強度分布

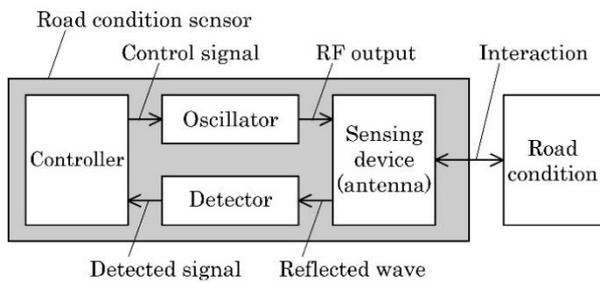


図-2 路面状態センサの構成

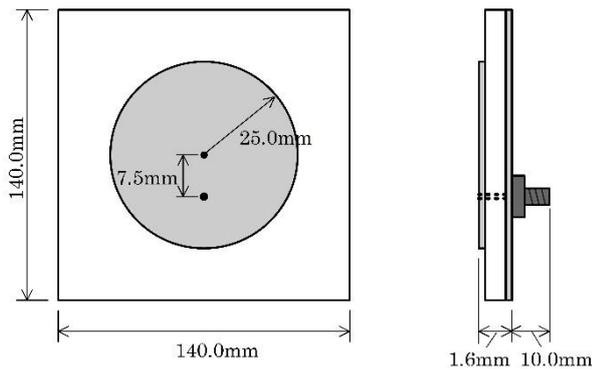


図-3 センシング素子の構造

(長さ L (m), 電流 I (A)) の最大放射方向における電界強度 E (V/m)は,

$$E = \frac{ILe^{-jkr}}{j4\pi\omega\epsilon} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{jk}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \quad (1)$$

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (2)$$

で与えられる⁹⁾。ここで、 r はアンテナからの距離(m), ω は角周波数(rad/s), ϵ は媒質の誘電率(F/m), μ は媒質の透磁率(W/Am), j は虚数単位である。

図-1 に、式(1)より求めた電界強度分布を距離 r に関して以下 3 成分に分けて示す。(a) r^3 に比例する項は準静電界であり、アンテナの極近傍に強く分布する。(b) r^2 に比例する項は誘導電界であり、交流電流による電磁界に相当する。(c) r^{-1} に比例する項は放射電界であり、アンテナ遠方において支配的となる。

レーダに代表されるリモートセンシング技術は、アンテナ遠方 (≥ 2 波長) の放射電界が支配的な領域で、媒質差異から生じる電磁界散乱を受信する方式である。電波伝播に伴い電界強度が低下するため、大出力送信回路と小信号受信回路が必要であり、高コストである。一方、従来方式^{8),9)}はアンテナ極近傍 ($\leq 1/50$ 波長) の準静電界が支配的な領域の媒質をセンシングする方式であり、強い電界強度で媒質と結合し高感度である。ただし、距離による電界強度の変化が大きく、媒質識別には一定距離を維持する必要がある、車両振動と路面凹凸により路面との距離が変化する路面状態センシングには適さない。

提案方式は、アンテナ-媒質間距離 0.2~0.5 波長の放射電界と誘導電界の両方が結合する領域でセンシングする方式である。レーダ方式と比較して、電波伝播による損失が小さく送受信回路を安価に実現できる。また、従来方式と比較して、距離による電界強度変化を緩和することが期待できる。

3. 路面状態センサの構成

図-2 に路面状態センサの構成、図-3 にセンシング素子の構造を示す。

提案する路面状態センサは、制御部、発振部、センシング素子、検出部から構成される。主要動作は、発振部から高周波電力を出力し、センシング素子で路面状態に応じて反射した電力を検出部で検出する。制御部では、発振部を制御するとともに、検出部からの検出信号をもとにセンシング素子の反射係数 (= 反射電力/出力電力) を算出する。本稿では、路面状態に応じたセンシング素子の反射係数 (振幅成分) を測定することで、路面状態の識別可否を検証する。

センシング素子(マイクロストリップアンテナ)は、誘電体基板の前面に円形導体、背面に一面導体を配置する構造であり、背面方向の媒質の影響を受けにくい特徴がある¹⁰⁾。よって、素子前面を路面に、背面を車体に向けることで、車体の影響を受けることなく路面状態センシングが可能である。

4. 路面状態の識別評価

(1) 評価条件・方法

図-4 に、評価に使用した路面状態センサの評価系を示す。路面状態センサは、センシング素子、同軸ケーブル、ネットワークアナライザ (アジレント社製 E5071C)、固定フレームを用いて構成した。センシング素子を車両下

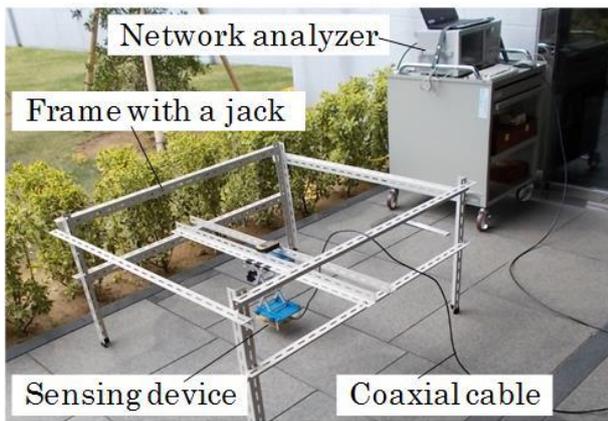


図-4 路面状態センサの評価系



図-5 評価対象 (アスファルト舗装, コンクリート舗装)

表-1 評価パラメータ

Item	Value
Pavement type	Asphalt / Concrete
Road condition	Dry / Wet
Distance	60 mm ~ 140 mm
Frequency	$0.85 f_{res} \sim 1.15 f_{res}$

部に配置することを想定し、素子背面を機械式ジャッキとフレームで固定し、前面を路面に向けて空中に保持し、路面との距離は機械式ジャッキで調整する。また、センシング素子の背面コネクタから同軸ケーブルを介して、ネットワークアナライザに接続し、反射係数を測定する。

本評価系におけるセンシング素子単体の共振周波数(最小反射係数)は設計周波数に対して誤差 0.4%であり、ほぼ設計通りの動作が確認できた。以降の評価結果では、周波数を共振周波数 f_{res} で規格化して示す。

図-5に、評価対象の路面状態を示す。また、表-1に評価パラメータをまとめる。評価対象は、日立製作所横浜研究所内の舗装路面(アスファルト、コンクリート)において、乾燥と湿潤の2状態とした。評価パラメータは、路面間距離60mm~140mm(10mm間隔)で可変し、測定周波数 $0.85f_{res} \sim 1.15f_{res}$ ($0.0002f_{res}$ 間隔)とした。

評価方法は、乾燥路面で路面間距離を固定して測定周波数毎に反射係数を測定し、路面間距離を変更して同様の測定を繰り返す。乾燥路面を測定後、同じ路面に散水し、湿潤路面について同様に測定する。この評

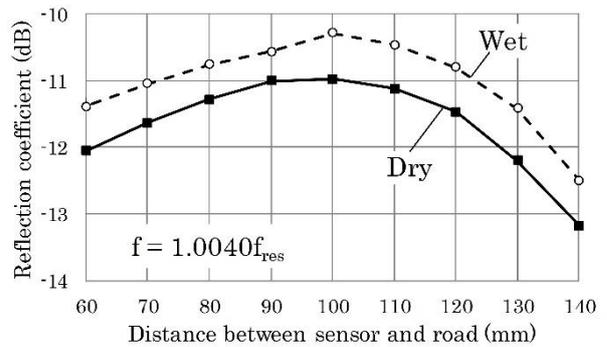


図-6 アスファルト舗装における反射係数特性

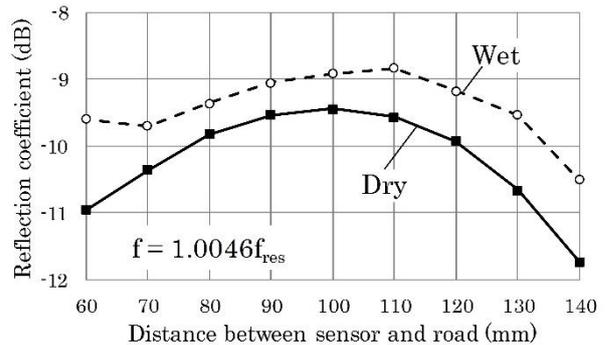


図-7 コンクリート舗装における反射係数特性

価工程を、アスファルト舗装、コンクリート舗装で実施した。なお、測定日2018年4月12日は曇りであり、当日含め6日間に降雨がなく、路面は乾燥状態であった。

(2) 路面状態による反射係数の変化

図-6にアスファルト舗装の反射係数特性、図-7にコンクリート舗装の反射係数特性を示す。この時、評価パラメータは、路面間距離を変化させ、測定周波数は各舗装で一定とした。

アスファルト舗装およびコンクリート舗装では、路面間距離100mmを中心に凸型の反射係数特性が得られ、路面間距離60mm~140mmの範囲において路面状態の差異(乾燥/湿潤)は交差しないことが確認できた。この結果から、乾燥と湿潤による反射係数特性の中間に閾値を設けることで両者を識別できる。また、路面間距離80mm~120mmの範囲では、路面間距離に対して平坦な反射係数特性が得られ、閾値一定で路面状態を識別できる。

ただし、本結果を得るには、舗装種類ごとに適した周波数で測定する必要がある。したがって、路面状態の評価前に、舗装種類を特定する必要がある。

(3) 舗装材料の識別方法

図-8に、アスファルト舗装(乾燥/湿潤)・コンクリート舗装(乾燥/湿潤)における路面状態センサの反射

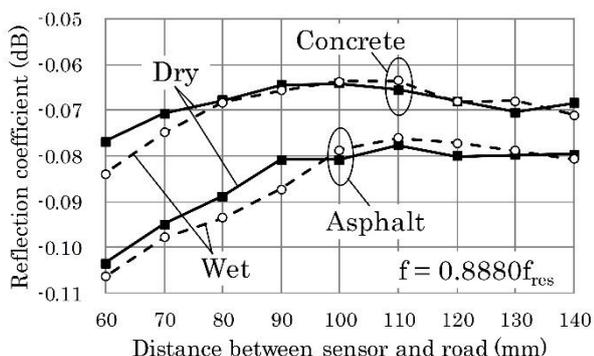


図-8 舗装種類を識別可能な反射係数特性

表-2 水・舗装材料の比誘電率

Material	Relative permittivity
Water ¹¹⁾	> 80
Concrete ¹²⁻¹³⁾	4.8 ~ 5.59
Asphalt ¹²⁻¹³⁾	3.6 ~ 3.86

係数特性を示す。このとき、センサ構成は同一であり、路面状態識別とは異なる周波数で測定した。

アスファルト舗装とコンクリート舗装による反射係数特性は、路面状態（乾燥/湿潤）の影響が小さく、舗装種類により異なる特性を示す。よって、両者中間に閾値を設定することで、路面状態の影響を受けることなく、舗装種類を識別可能である。

また、路面状態センサと距離センサを併用し、(1)路面間距離の測定、(2)舗装種類の識別（図-8）、(3)路面状態の識別（図-6、図-7）の実施により、舗装種類と路面間距離に応じた閾値を設定することで、高精度な路面状態の識別が期待できる。

(4) 考察

センシング素子の反射係数変化の大きさは、コンクリート舗装・水>コンクリート舗装>アスファルト舗装・水>アスファルト舗装の順であり、表-2に示す比誘電率の大きさ順と概ね一致することから、アンテナ特性変化として妥当であると考えられる。

また、本評価におけるアスファルト舗装では、その遮水効果により舗装内部への透水が少ないため、水による誘電率増加が限定的であり、コンクリート舗装に比べて反射係数の変化が小さい。しかし、舗装路面は不均質な混合物であり、材料、表面粗さ、空隙などの要因によって誘電率が異なることを考慮すると、路面状態識別を高精度化するには舗装種類の識別が重要である。

5. 結言

アンテナ近傍媒質応答により反射係数が増加する現象を応用した路面状態センサを提案し、アスファルト舗装・コンクリート舗装における路面状態識別可否を検証した。その結果、路面間距離 80mm~120mm において乾燥・湿潤を識別できることを確認した。さらに、距離センサを併用して路面間距離に応じた閾値設定により、舗装種類を識別し、かつ、路面状態の識別可能距離を 60mm~140mm に拡大できる。以上の結果から、車載型路面状態センサの実現見通しを得られた。

参考文献

- 1) 内閣府：未来投資戦略 2017，2017。
- 2) 国土交通省：自動車の先進安全技術の現状，2017。
- 3) Kawai, S., et al.: A method to distinguish road surface conditions for car-mounted camera images at night-time, *12th International conference on ITS telecommunications*, 2012.
- 4) Optical Sensors : Road Eye, 2012.
- 5) ブリヂストン：「CAIS」コンセプトに基づいた路面状態判別技術が世界初の実用化，ニュースリリース，2015。
- 6) 池田一樹，田口裕二郎：マイクロストリップアンテナを用いたスノーセンサの基礎的検討，電子情報通信学会論文誌 B, vol. 89-B, no. 6, pp. 1011-1013, 2006.
- 7) 脇田喜之，山田寛喜，山口芳雄：ダイポールアンテナを用いた土壌の媒質定数の推定法，電子情報通信学会論文誌 B-II, vol. 81-B-II, no. 8, pp. 797-804, 1998.
- 8) 国土交通省：道路運送車両の保安基準，第 3 条，2018。
- 9) 虫明康人：アンテナ・電波伝搬（28 版），第 2 章，コロナ社，1990。
- 10) 羽石操，平沢一紘，鈴木康夫：小形・平面アンテナ（3 版），第 4 章，電子情報通信学会，2003。
- 11) Tiuri, M.E., et al.: The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-9, no. 5, pp. 377-382, 1984.
- 12) 齊藤清文 他：トンネル内 ETC における壁面に必要な反射特性に関する解析的検討，電子情報通信学会論文誌 B, vol. J95-B, no. 6, pp. 769-773, 2012.
- 13) Dogan, M., et al.: Detection of conducting and dielectric objects buried under a layer of asphalt or concrete using simulated ground penetrating radar signals, *International conference on electromagnetics in advanced applications*, pp. 1535-1538, 2017.