

路面湿潤センサシステムの開発

Development of a Moisture Sensing System for Road Surface Monitoring

芝 栄一^{*}
Eiichi Shiba

森川 孝行^{*}
Takayuki Morikawa

勝美 隆一^{*}
Ryuichi Katsumi

概 要 ITSにおける車両への路面情報提供を目的として、また一般的な道路管理における路面センサとして路面湿潤センサシステムの開発を行った。路面湿潤センサシステムは路面に複数のセンサヘッドを埋設し、乾燥、湿潤、水膜、凍結など多地点の路面状況データを収集解析できるものである。接触型センサなので雨、霧など気象状態に左右されず測定でき、応答性、信頼性に優れており、非接触型に比べて安価であるという特徴がある。フィールド実験の結果路面の湿潤程度の多段階の判別、水膜状態での水膜厚さ変化の判別、凍結の判別など予定の性能を確認することができた。

1. はじめに

21世紀に向けてより安全、快適な交通システム、渋滞を軽減し輸送を効率化して環境改善を目指した交通システムとしてITS（Intelligent Transport Systems）の研究開発が進められている。ITSの開発分野には既に実用化が開始されようとしている自動料金収受システム（ETC）をはじめナビゲーションシステムの高度化、安全運転の支援、道路管理の効率化、歩行者の支援など様々なものがある。当社においてもITSに関連した種々の分野での研究開発を進めているが、その一つとして路面状況に関する情報を車両や道路管理システムに提供することにより車両の運転支援や道路管理支援を行うことを目指した路面センサの開発がある。ここでは接触型路面センサとして、路面の乾燥、湿潤、水膜、凍結などを判別する接触型路面湿潤センサシステムの開発について報告する。

2. 路面摩擦係数と路面センサ

路面が雨で濡れていたり、凍結していると車のタイヤと路面の間の摩擦係数（路面摩擦係数）が低下してスリップしやすくなる。路面摩擦係数は車両の走行において重要な因子であり、路面状況のほかにタイヤの種類や減り具合、車両の速度などに依存する。また高速走行になるほど路面摩擦係数は路面の湿潤程度により大きく変化することが知られている。図1は車両走行時にブレーキをかけて路面とタイヤの間に最大の制動力が得られた場合の路面摩擦係数の値を、走行速度を横軸として示したものである。湿潤状態でも路面の水膜厚さがほとんどない場合と、1 mmの場合とでは路面摩擦係数は大きく変わっている。また降雨の始まりなどでは、路面のほこりなどと水分が混合して非常に滑りやすい路面となり、完全に路面が濡れた時点

よりも路面摩擦係数が低下する場合があることが知られている。以上のように路面の湿潤は車両の走行にとって非常に重要な情報であり、それも素早い情報提供が必要なが分かる。また湿潤や水膜路面より更に路面摩擦が低いのが凍結路面である。積雪路面は通常ドライバーが視認することで運転に注意するが凍結路面は気づかないことがあり、ブラックアイスと言われる路面に薄い氷膜が形成されているような場合は凍結していることが分かり難く非常に危険である。寒冷地では路面凍結の情報は特に重要となる。

路面センサは車両側では一般に把握しにくい道路側の因子である路面状況を検知し、その情報を提供することにより車両の走行を支援する。路面センサには大きく分けて接触型と非接触型の二つがある。接触型センサは路面にセンサを埋設するなどして、センサを路面を覆う水や氷などに直接接触させて路面状

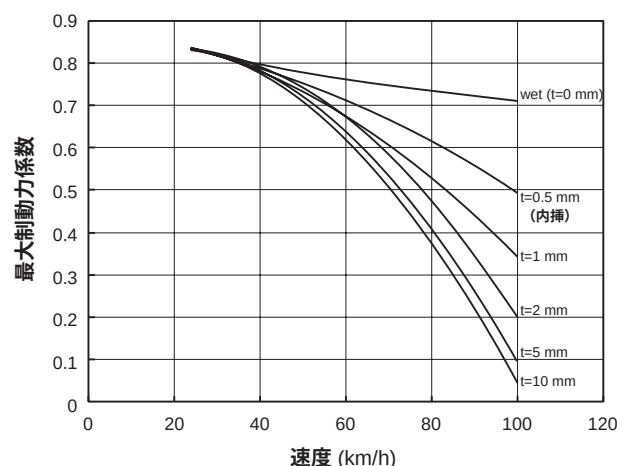


図1 最大制動力係数の速度依存性¹⁾
Vehicle velocity dependence of friction coefficient at the maximum braking force

^{*} 横浜研究所 ITS 開発センター

態を判別するものである。接触型センサは路面に密着して観測するので、一般に

- ・気象環境や昼夜間の違いに影響されない。
- ・車両が走行してもほとんど影響されない。
- ・原理的にシンプルなので信頼性が高く応答が早い。
- ・一般に安価である。

などの特長がある。しかし、多数のセンサを配置しないと広い路面を観測できない点や、センサが検知する舗装表面と車両のタイヤが接地する走行路面の状況が異なる場合は、肝心の走行路面の状況を判定できないという問題がある。一方非接触型は、上方から路面を見るので

- ・路面状況によらず原理的に走行路面を観測できる。
- ・センサにもよるが路面を数m～数十mの大きさの面で観測できる。

などの特長がある。しかし気象環境の影響を受けやすく、また交通量が多いと車両で路面が遮蔽されるのでこれを補正する必要がある。また原理的に複雑になることや面観測となることから応答が一般に遅くなり、価格の点でも一般に接触型に比べて高価になる。

路面センサとして接触型センサ、非接触型センサ共に使用されているが、上記のように両者の関係は相互に補完的な形になっており路面状況を効果的に把握するには両者の特長を生かして共用するのが望ましいと考えられる。

3. 路面湿潤センサシステム

3.1 原理

図2、図3に路面湿潤センサシステム（以下湿潤センサと略す。）の原理図を示す。湿潤センサはセンサヘッドの表面の水分の多寡や凍結により円環状電極間のインピーダンスが変化する

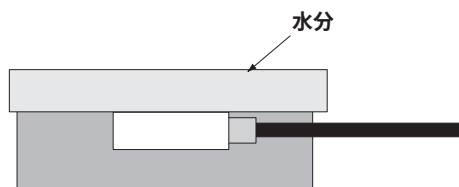


図2 センサヘッド設置概念図
Cross section view of the sensor mounted in the pavement

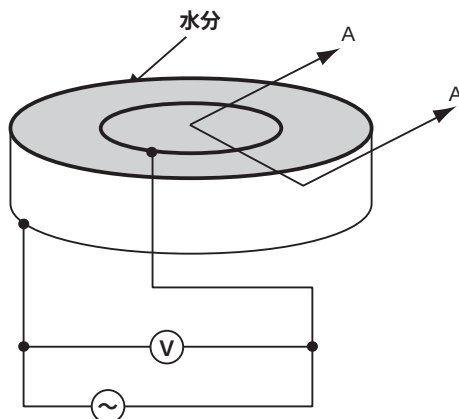


図3 湿潤センサ原理図
Principle of moisture detection by the sensor

るのを利用して、路面に埋設したセンサヘッドの電極間のインピーダンスを測定することにより路面の乾燥、湿潤、水膜、凍結などを判別するものである。センサヘッドの表面を濡らすと表面の濡れの程度が大きいほど電極間インピーダンスは低下する。電極間インピーダンスの大きさについては、以下のように考察することができる。

湿潤センサのセンサヘッドは円筒状で、水分を検知する同軸同心円筒の電極を持っている。湿潤センサでは通常二対の電極を並列接続させたセンサヘッドを用いているが、原理的には一対でも同じであるので、一対の対向する同軸対称円筒電極について考えることで、湿潤センサの電極間インピーダンスの目安をある程度知ることができる。系は同軸対称なので、図3のA-A矢視断面について考察すれば良いわけであるが、更に電極に電圧が加わったときに電流が流れるのはセンサヘッド表面の薄い部分であることから、電場は大部分センサヘッド表面に平行に集中していると考えられる。よって解析ではA-A矢視断面を更に図4のように簡略化する。このような系について電極間に電圧Vを印加したときの電場Eを算定すれば流れる電流量がわかるので、これより電極間インピーダンスを知ることができる。電場Eは静電場と同じであるから容易に次式で表される。

$$E = \frac{V}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)r} \quad (1)$$

これより r_1 、 r_2 をそれぞれ内外電極から円筒の中心までの距離とし、電流の流れる媒体の抵抗率を ρ 、厚さを t とすれば、インピーダンスRの表現として次式が得られる。

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi t} \rho \quad (2)$$

センサヘッド表面の水膜厚さを1mmとしてインピーダンスを計算すると、水道水の抵抗率は通常約 $7 \times 10^3 \Omega \text{cm}$ であるから、先の電極間インピーダンスの表式により、

$2r_1 = 88 \text{ mm}$ 、 $2r_2 = 118 \text{ mm}$ 、 $\rho = 7 \times 10^3 \Omega \text{cm}$ 、 $t = 1 \text{ mm}$ 、として $R = 3 \text{ k}\Omega$ である。

センサヘッドは並列に内側にもう1組の電極を持つのでセンサヘッドの実際の構造に換算すると $2 \text{ k}\Omega$ 程度と考えられる。

水道水を用いて1mm～5mmの水膜について行った測定結果と上の解析結果を図5に示す。水膜厚さが薄いところでは解析結果は測定結果に近い値を示しているが、水膜厚さが厚くな

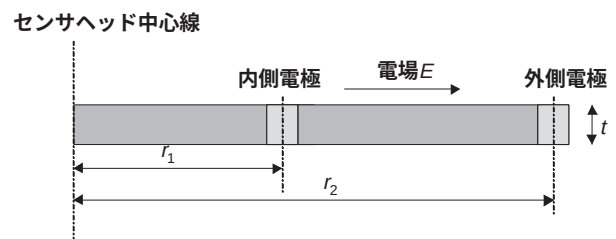


図4 簡略化されたセンサヘッドの断面図
Simplified cross section view of the sensor

ると両者のずれは大きくなっている。解析では水膜厚さは電極間距離に比べて十分小さいと仮定しているの、水膜厚さが厚くなるとともにインピーダンスの変化の傾向は解析結果と合わなくなると考えられる。水膜厚さが無限大であっても電流分布は電極近傍に集中すると考えられるので、水膜厚さが厚くなっていくと図5のように電極間インピーダンスはある値に漸近すると考えられる。

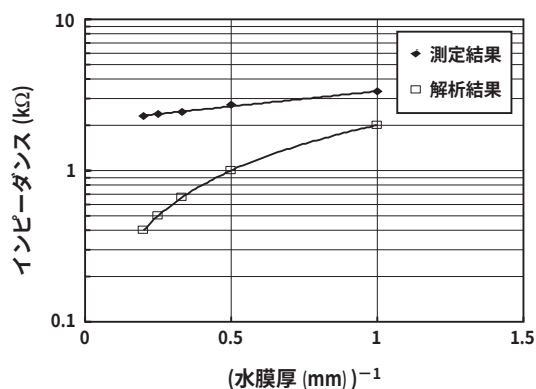


図5 水膜状態のセンサヘッド電極間インピーダンス
Sensor impedance vs. the reciprocal of water film thickness

水膜状態よりさらに水が少なくなり、センサヘッドが湿った状態になると電極間インピーダンスは急激に増大する。センサヘッドの電極間インピーダンスが1~2 MΩになるとセンサヘッド表面は指で触れてもかなり乾いた状態となる。

一方センサヘッド表面の水が凍結すると氷は水に比べて抵抗率が高いので、このインピーダンス変化から路面凍結が検知できる。先の水膜の場合と同様に電極間インピーダンスを求めてみると、純粋な氷の抵抗率は、 $\rho = 3.6 \times 10^7 \Omega \text{cm}$ であるから、 $2r_1 = 88 \text{ mm}$, $2r_2 = 118 \text{ mm}$, $\rho = 3.6 \times 10^7 \Omega \text{cm}$, $t = 3 \text{ mm}$, として、 $R = 6 \text{ M}\Omega$ である。

これを実際のセンサヘッド構造に換算すると約4 MΩとなる。氷の純度や水分の残留を考えれば更にインピーダンスは上記の値より小さくなると思われるが、およその目安としてMΩ程度のインピーダンスであると考えられる。これは水道水を凍らせたときに測定された約1 MΩという値と同程度の大きさである。ただセンサに求められるのはほぼ凍結した状態を凍結してゆく過程において検知することなので、このような大きなインピーダンス値を示す以前の適当な時点で凍結判定をすることが求められる。またインピーダンスの上昇は乾燥過程とも判断できるが、湿潤状態についての実験によれば、水膜が薄くなってからは乾燥にいたるまでの湿潤状態の変化は非常に早く、インピーダンスは非常に高い値まで急激に上昇していく。一方凍

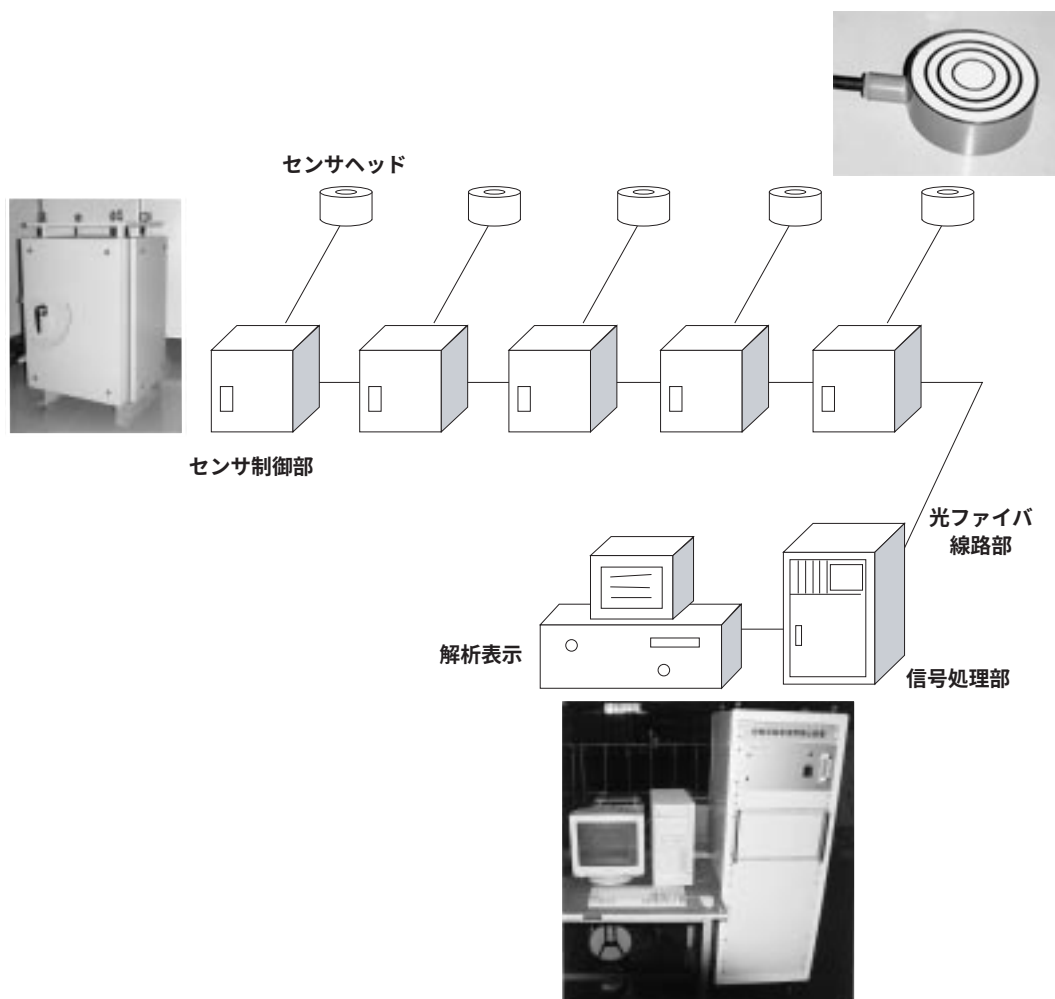


図6 湿潤センサ構成図
Schematic view of the system

表1 湿潤センサの仕様
Specification of the system

項目	仕様	備考
路面判別機能	マーカ表示: 4種	乾燥, 湿潤, 水膜, 凍結を各センサごとにマーカ表示。
	インディケータ表示: 11段階	乾燥状態から凍結状態までインディケータの長さで表示。
解析・記録機能	現在データ表示・保存	各センサのデータ収集, 表示と平行しての同時保存可能。
	過去データグラフ表示	各センサのデータ収集, 表示と平行処理可能。表示センサ, データの選択可能。
	データ処理	各センサの移動平均可能。平均化データ数は1~256で可変。
	外部出力	RS232C (常時出力可) 10base-T/100base-TX
その他機能	路面温度計測	温度範囲=-20℃~80℃ 別途接続の白金測温抵抗体による。
	気温計測	温度範囲=-20℃~80℃ センサ制御部内蔵の白金測温抵抗体による。
	気象計測	センサ制御部付属の気温, 湿度, 気圧, 風速センサなどによる。
センサ出力速度	250 ms以内	センサ制御部1台あたり。
信号伝送	1 km以上×双方向	伝送異常検知機能あり。
動作環境	-10℃~60℃	屋外用機器。ただし結露のないこと。
定格電圧	AC 90 V~110 V	各機器とも。
絶縁抵抗	10 MΩ以上 (DC 500 V)	入力電源回路~アース間。
耐電圧	AC 1 kV×1分間	入力電源回路~アース間。

結過程は水から氷への相転移を伴うので乾燥に比べてずっとゆっくり進行し、前述のとおり完全に凍結したときでもインピーダンスは乾燥に比べてはるかに低い値を示す。凍結判定は更に気温や路面温度が氷点近く下がってきているという条件を考慮しながら、上記のようなインピーダンスの時間変化や上限などを考慮して行う。

3.2 湿潤センサの構成及び各要素の機能の実例

湿潤センサの構成例と各要素の写真を図6に示す。全体が円筒状のセンサヘッドは絶縁材と2組の円筒状同軸同芯電極とで構成されている。センサヘッド上面は、道路表面とほぼ同じレベルになるよう埋設され、これにより道路表面が乾燥, 湿潤, 水膜, 凍結のいずれであるかを判別できるようになっている。図6には明示していないが、センサヘッドのそばには白金測温抵

抗体が埋設されており、路面温度を計測できるようになっている。

センサ制御部は内蔵のドライバによりセンサヘッドを交流駆動し、その出力は信号処理されて電極間インピーダンス値に対応した信号電圧が取り出される。これらの信号群は信号間のアイソレーションのためにV/F変換され、その後通信制御LSIに入って他のチャンネルからの信号と合わせてシリアル変換され、デジタル光リンクでE/O変換されて光信号として送り出される。路面温度計や気温計などは専用の温度計用トランスデューサで駆動されている。出力信号電流は電圧に変換され、信号電圧は湿潤センサと同様に処理される。また内蔵の湿度や気圧, 風速など気象環境の付加情報を計測するセンサの出力信号も併せて光信号に変換されて送出される。

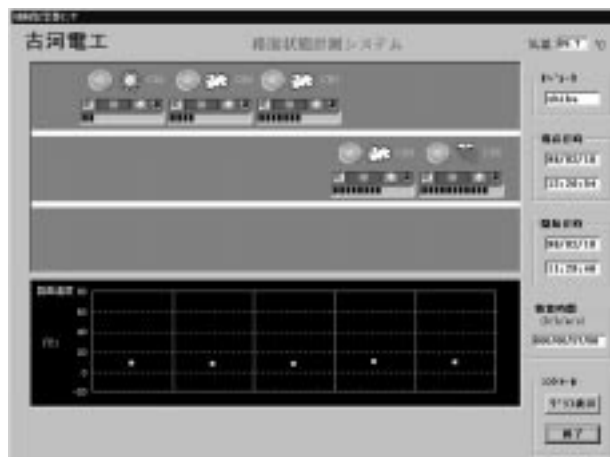


図7 湿潤センサ画面例
An example of system display

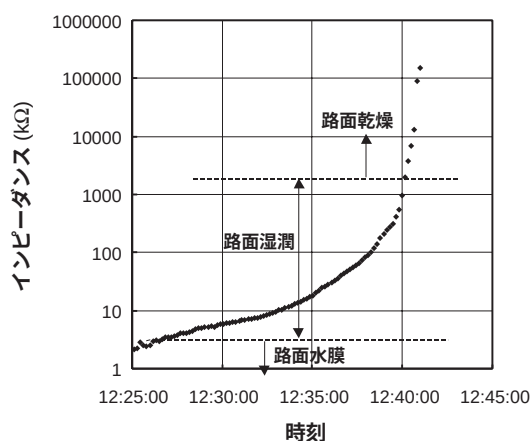


図8 水膜状態から乾燥する過程でのセンサヘッド電極間インピーダンス変化
Sensor impedance change during drying from very wet conditions



図9 散水された湿潤センサ
Wet sensor mounted in the pavement

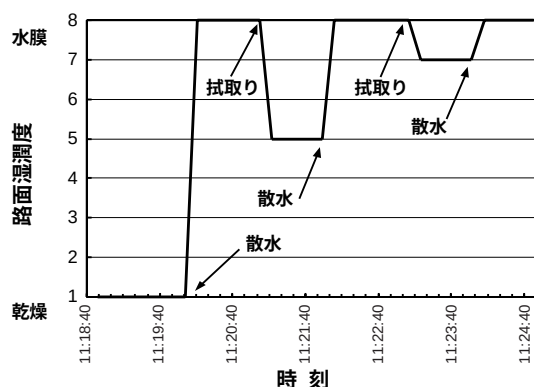


図10 湿潤センサの応答特性
Response chart of the sensor

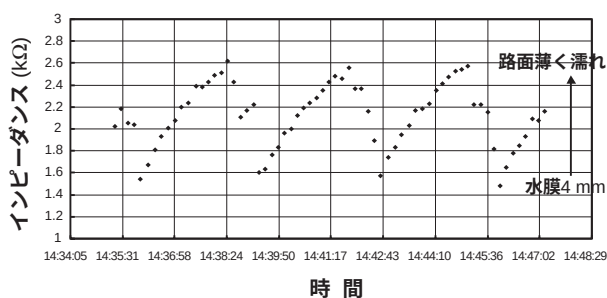


図11 反復散水に対する湿潤センサの出力
Response of the sensor during cyclic showers

光ファイバ線路部は屋外設置可能なアルミラミネートポリエチレンシースを持ったコード集合型光ファイバケーブル群から構成されている。光ファイバ芯線は一般的なGI型マルチモードファイバであるが、遠距離までの信号伝送が可能なように伝送波長1.3 μm のものが選ばれている。

信号処理部では基本的に送出側であるセンサ制御部と逆の処理が行われてもとの電圧信号が復元される。復元されたパラレルのアナログ信号はマルチプレクサで順次走査されて取り出され、解析表示部の多チャンネルA/Dボードに入力され解析表示部で処理される。またここでは逆に解析表示部から出された制御信号を受けてこれを光信号に変換して光ファイバ線路部に送り込むことも行われる。

解析表示部は、得られたデータの解析と表示及びシステムの

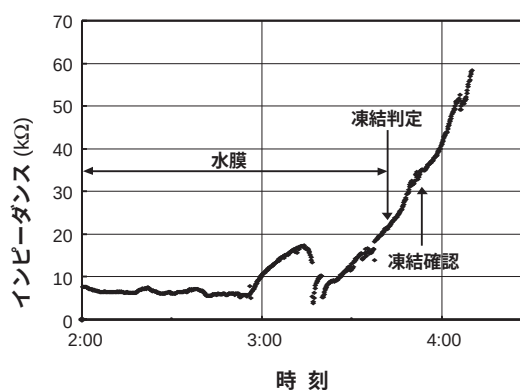


図12 路面凍結時の湿潤センサの出力変化
Sensor impedance change during freezing from very wet conditions

制御を行う。解析表示部を起動することにより、センサからの信号は処理されて路面に配置された複数のセンサの状態及び路面温度、気温などがディスプレイ上に表示される。また別画面では湿度、気圧、風速なども知ることができる。解析表示部の表示機能にはシステム状態表示、グラフ表示、設定表示の大きく分けて3つがあり、これら機能ごとにまた複数の画面がある。設定表示を行う画面ではシステムの機能変更ができるようになっている。ユーザーはセンサデータ収集を行いながら必要に応じて画面を切り替えてシステムを運用できるようになっている。解析表示部は画面表示機能のほかにデータ保存、伝送異常検知、データ外部出力などの機能を持っている。すべての収集データは一定時間ごとにハードディスクに書き込まれ、過去の路面状態、温度データ、気象データなどすべてのセンサデータの履歴を時間に対してグラフ表示することができる。また必要ならリアルタイムでデータをグラフ画面上で観測することや任意の2つのデータの時間変化を画面で並べて比較することもできる。時間的なデータのふらつきに対しては、任意時点から256個までの任意のデータ数について移動平均処理が行える。また信号伝送処理回路の異常検知機能を利用してデータ伝送が正常かどうかを画面で監視することができるようになっている。データ収集は重要であるから、一部に断線やコネクタ接続不良などがあって信号伝送異常が検知されたとしてもソフトウェアはハングアップを回避してデータ収集を継続できるように設計されている。また外部への出力としてRS232Cが用意されており、10base-Tないし100base-TXでのネットワーク環境にも対応している。

3.3 湿潤センサの仕様と機能

湿潤センサの仕様を表1に示す。

湿潤度の変化に対してセンサヘッドの電極間インピーダンスは何桁もの変化をするので、本システムでは湿潤度の指標としてインピーダンスの対数をとって整数値化し、これを用いている。具体的には湿潤度は標準で6段階に区分し、最も乾燥度が高い「2」から最も湿潤度の高い「7」までの整数値で出力する。このほかの路面状況については乾燥状態は「1」と判定する。また逆に水分の多いほうは、湿潤度が「7」を越えた状況を水膜状態と区分し、水膜の薄い状態を「8」、水膜の厚い状態を

「10」、その間を「9」で判別する。凍結は「-1」で示し、合計11種の整数値で路面状態を区別している。

解析表示部の画面の例を図7に示す。チャンネル番号が付記された各センサについて、チャンネル番号の左は路面が乾燥、湿潤、水膜、凍結の4状態のいずれにあるかを明示するマークで、それぞれ

乾燥=太陽、湿潤=雲、水膜=降雨、凍結=雪

のマークが対応しており、一見して状態がわかるようになっている。この下に四角ドット（■）のつながりで表された路面状態インジケータが示されていて、これが先の整数値で表した路面状態判定結果と対応するようになっている。データ伝送が正常かどうかは、上記の路面状態マークが断線マークに変化することで判別できるようになっている。

4. 路面湿潤センサの特性評価

以下では湿潤センサのセンサヘッドを実際にアスファルト路面に埋設した状態で路面を様々な状態にして行った湿潤センサ特性評価実験から、湿潤度判別、水膜厚判別、凍結判別に分けてデータ例を報告する。

4.1 湿潤度判別

車両の走行のない実際のアスファルト路面に数十mの長さで水を撒き、それが乾燥する過程を路面湿潤センサで測定したときの結果を図8に示す。ここではセンサヘッドの電極間インピーダンス値を縦軸に、経過時間を横軸にとっている。湿潤センサは水膜状態から湿潤状態を経て完全に乾燥するまでほぼ連続的に路面の湿潤度を測定できているのがわかる。また湿潤センサは応答性が良いことが特徴であるが、図9の写真のようにセンサヘッドに対して散水し、その後水をふき取ることを反復してセンサの応答性を調べた結果を図10に示す。湿潤状態の変化をすばやく検知していることがわかる。

4.2 水膜厚判別

アスファルト路面に埋設した路面湿潤センサに約3分の周期で散水したときの湿潤センサの電極間インピーダンスの変化を図11に示す。水膜厚さは最大で約4mmで、水膜厚さが最も薄い状態ではほぼ路面から水が引けている状態である。測定は短時間であるが水膜厚さとインピーダンスがよく対応していることがわかる。

4.3 凍結判別

寒冷地においてアスファルト路面に埋設した路面湿潤センサに深夜散水し、明け方にかけての気温低下による路面凍結を測定した結果を図12に示す。図12は横軸を経過時間、縦軸をセンサヘッド電極間インピーダンスにとり、目視によりほぼセンサヘッド表面が凍結した時刻とその10分ほど前にシステムが凍結判定をしたことを示している。このときの路面温度は約-1℃であった。

5. おわりに

道路情報の大きな要素である路面情報のセンシング技術は、ITSにおいて車輛走行支援や道路管理支援の基礎技術として今後も要求されると考えられる。路面センサは既にいくつかの種類が実道に配備運用されてきたが、信頼性という点だけでもまだ改善すべき点がある。本湿潤センサは、原理がシンプルゆえに信頼性が高く応答が早く、また環境の影響を受けにくく安価であるという特徴がある。今後センサヘッドやセンサ制御部の形状、材質の改良や小型化、電源形態や通信形態の工夫、他システムとの複合化などセンサ全体を見直すことで、より優れたセンサ、独自のセンサに展開できる可能性を持っていると考えている。

参考文献

- 1) 酒井秀男:タイヤ工学, グランプリ出版, (1987), 274