

## 路面下探査車「ロードビジュアライザー」の開発 — 概要と適用例 —

前川 聡\*・山下 善弘\*・村上 弘行\*

A development of the vehicle for exploring structures under roads using GPR,  
“Road Visualizer” : An introduction and case studies

Satoshi Maekawa\* , Yoshihiro Yamashita\* and Hiroyuki Murakami\*

### Abstract

It is becoming increasingly that existing infrastructures break down caused by their aged deteriorations, such as occurrences of cavities beneath road generated by water leakage from old underground pipes, or dropping down of deteriorated concrete of bridge decks. These cases are considered to continue increasing in the context of the reduction in construction investment in Japan. In such social situation, technologies of investigating and evaluating the residual function of existing infrastructures are needed for efficient maintenances and managements. We developed the vehicle for exploring under road structures with Ground Penetrating Radar (GPR) system “the Road Visualizer”. The Road Visualizer consists of a car-towed trailer with GPR antennas and a vehicle with measuring instruments, i.e., GPR controllers, non-contact distance meter, VRS RTK-GPS and video cameras. The trailer can mount six 400MHz ground coupled antennas and two 2GH air-coupled horn antennas. At the GPR system, we use the instrument which can collect with high-speed sampling so as to obtain the same quality GPR data as man-towing measurement with car-towing measurement. We can acquire six channels of GPR data simultaneously with the Road Visualizer. The distance accuracy of relocations of detected anomalies from GPR is around 1m with synchronization among GPR data and RTK-GPS positions and video images. We can survey without traffic control not only at open roads but also at highway roads with this system. In this paper, we introduce a brief summary of the Road Visualizer, and explain about some case studies of the surveys for detecting cavities beneath roads, confirming underground utilities and measuring pavement thickness. And we also mention about the fundamental studies about the development of our system.

**Keywords :** maintenance, investigation and evaluation, car for exploring under road structures, ground penetrating radar, high speed sampling, accurate relocation of detected anomalies

### (要 旨)

整備・蓄積されてきた社会資本について、建設後相当の期間を経過するケースが増えつつあり、老朽化に伴う障害事例が見られる。例えば、道路や下水道の老朽化が原因で発生した空洞による路面陥没や、RC橋梁の床版コンクリートの劣化による抜け落ちなどである。このような障害は、建設投資が減少の一途を辿る状況において今後も大幅に増加する傾向にあると予測され、構造物の維持管理を効率的に行うための調査・評価技術が求められている。

このような社会的要請のなか、筆者らは昨年、地中レーダによる道路構造物調査を主目的とした路面下探査車「ロードビジュアライザー」を開発した。ロードビジュアライザーは、6台の400MHzアンテナ、2台の2GHzホーン型アンテナを搭載可能なトレーラ車と、これらを制御する地中レーダ機器および非接触距離計、ネットワーク型のRTK-GPS、ビデオカメラを搭載した測定車により構成されている。

\*応用地質(株)エンジニアリング本部

\* OYO Corporation

地中レーダは、測定者が人力でアンテナを牽引する一般的な測定方法と遜色ないデータが得られるように、高速サンプリングが可能な機器を導入した。ロードビジュアライザーではアンテナ6台分の地中レーダデータを同時に収録することができる。また、地中レーダデータはGPS情報、ビデオ画像と同期し、距離精度およそ1mで、地中レーダ記録上で検出された異常信号の位置を決定することが出来る。また、一般道のみならず高速道路においても車線規制を必要としない探査走行が可能である。

本論文では、ロードビジュアライザーの概要と、これまで供用道路上で実施した路面下空洞調査、埋設管調査、舗装厚の測定例といった適用事例について紹介する。あわせて開発に際して行った基礎検討についても述べる。

キーワード：維持管理、調査・評価、路面下探査車、地中レーダ、高速サンプリング、高精度位置検出

1. まえがき

道路は、国民の生活、経済を支える施設であり、安全性が持続的に確保されなければならない。ところが、上下水道等の地下埋設物の老朽化・劣化等に伴い、路面下の路盤、路床の吸出しを原因とする空洞により多数の路面陥没が発生しているのが現状であり、道路構造物の適正なマネジメントを実施するための総合的な対策が求められているところである。

こうした地下浅部を探査する方法として、非破壊で連続測定を行うことができる地中レーダ探査が用いられている。近年、地中レーダ探査機器の性能が向上し、これまでより高速の波形サンプリングが可能になってきた。このため探査機器を車載した車両により、道路規制を行わずとも一般的な人力でのアンテナ牽引による測定（以下、手引き測定と称する）に相当する記録を得られるようになった。

このような背景において、筆者らは2010年、地中レーダ装置を搭載した路面下探査車「ロードビジュアライザー」を開発した。

開発に際しては、方針として以下の5点を掲げた。

- 1) 一般道路だけでなく高速道路においても道路規制を行わないで探査できる
- 2) 手引き測定に近い記録密度で波形収録できる
- 3) 探査車の走行位置をできる限り正確に測定できる
- 4) 舗装厚が高精度で測定できる
- 5) 関連法規に抵触しない

さらに、探査車の開発に合わせて多量のデータを迅速に扱うことができるデータ処理ソフトも開発した。

本論文では路面下探査車及びデータ処理ソフトの概要をまとめるとともに、供用道路での空洞、埋設管、舗装厚の測定例を紹介する。さらに開発に際しての基礎的検討事項について述べる。

2. 開発した探査車の概要

開発した路面下探査車の概観を図-1に、機器のレイアウトを図-2に、主な仕様を表-1に示す。車両は米国GSSI社（Geophysical Survey Systems, Inc.）の地中レーダ測定器 SIR-20 および位置計測・カメラなど

の機器を搭載した測定車と、6台の400MHzアンテナ、2台のホーン型アンテナを搭載可能なトレーラ車により構成されている。



図-1 路面下探査車の概観

Fig.1 View of exploration vehicle under road

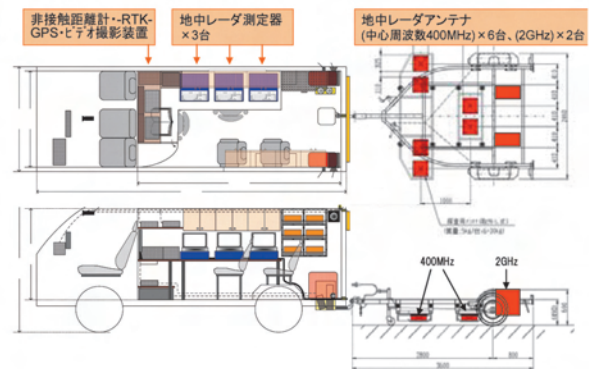


図-2 測定機器のレイアウト

Fig2 Layout of measuring instruments

表-1 路面下探査車の主な仕様

Table1 Specifications of exploration vehicle

項目	400MHzアンテナ	2GHzアンテナ
探査深度	1.5~2m	0.5~0.7m
検出可能空洞	深度2m 50cm x 50cm x 10cm以上	-
最大測定速度	60~80km/h	-
データ収録密度	512点/波形の場合(128~2048点/波形に可変可能) 走行距離に対して1~5cm間隔でレーダ波形を記録、80km/h走行時で、進行方向に対して5cm毎のレーダ波形を記録	走行距離に対して1~5cm間隔でレーダ波形を記録
探査幅	2.5m	2.5mの幅のうちの2測線(位置選択可能)
周辺画像・地図画像	3台の高感度カメラ、カーナビ画像	
車両位置評定とアンテナのポジショニング	非接触距離計、時間信号、ハンドマーク、周辺画像、RTK-GPS、音声による記録 RTK-GPS、非接触距離計、時間信号により、周辺画像がレーダ記録と同期し、高いポジショニングの精度を確保、同期方法について特許申請中 <sup>1)</sup>	
データ処理	全測線の記録の同時表示 1chあるいは任意測線の拡大表示 平面スライス、横断スライスの表示 アンテナマーク入力 空洞自動判定 周辺画像・地図画像表示 測線・アンテナ位置のデータベース(MAGIS)への取込み等	

400MHz アンテナを6台同時に測定できるようにしたのは、約2.5m幅を1回の走行で探査できるようにするためである。1台のSIR-20では2台のアンテナを接続・コントロールでき、3台のSIR-20を用いて6台のアンテナを同時に制御する。またアンテナ間の相互干渉防止のために、1セットの2台のアンテナ配置を互いに1m以上離す設計とした。

### 3. 適用事例

#### 3.1 路面下空洞測定例

供用道路において路面下空洞を検出した例を図-3に示す。地中レーダで路面下空洞を探査すると次のような特徴を持つ記録になって表れる。

- ①周囲よりも反射波の振幅が大きい。  
測定記録は、受信波形の振幅の大きさの程度と極性を白色と黒色の濃淡で表現している。この場合、正の極性は白色、負の極性は黒色で、振幅が大きい程濃い色調になる。
- ②道路表面と逆の極性の反射波になって表れる。  
空洞からの反射波の初動は道路表面からの反射波と逆の極性を示し、使用している測定器では負極性になる。
- ③多くの波形成分を伴うことが多い。  
空洞では前面と背面の二つの反射面と凸型の形状を示すことから、多重反射や散乱波を発生することが多く、初動以降に複数の波形成分を伴うことが多い。
- ④空洞は路盤層底面深度付近に表れることが多い。  
空洞箇所では路盤層底面からの反射波を切断する

ように、周辺とは異なった反射波が表れることが多い。

図-3では、①～④の特徴がch2-2, ch3-1, ch3-2の距離27.5～30m(異常信号箇所Aとする), 31～32m(異常信号箇所Bとする)で深度30cm付近に表れている。ch3-1の拡大図を示したが、典型的な空洞であると判断した。図-4に、この2箇所の広がりを見るために深度スライスを表した。図-4より異常信号箇所Aの平面的な広がりが大きいことが判る。図-4の深度スライス図で示した位置でスコープ調査を行った。その結果、路盤層の底面深度に空洞が認められた。異常信号箇所Aは深さが27cmで、平面的な広がりが0.85×1.75mになっており、異常信号箇所Bは深さが60cmで、平面的な広がりが1.0×1.35mになっていることを確認した。

#### 3.2 埋設管測定例

路面下探査車により道路を横断する埋設管を検出した例を図-5に、道路の縦断方向に敷設されている埋設管を検出した例を図-6に示す。

横断埋設管上で地中レーダ探査を行うと、埋設されている位置と深度付近に上に凸の双曲線状反射パターンが表れる。そして、これらの反射パターンが6台のアンテナのいずれの記録にも表れることが特徴である。測定例では距離368m付近で深度が0.9～1.0m, 距離376.5m付近で深度が1.5～1.7mに2本の横断埋設管が表れている。

次に縦断方向に敷設されている埋設管では、該当深度付近に、距離方向に連続する層状の反射波が表れる。

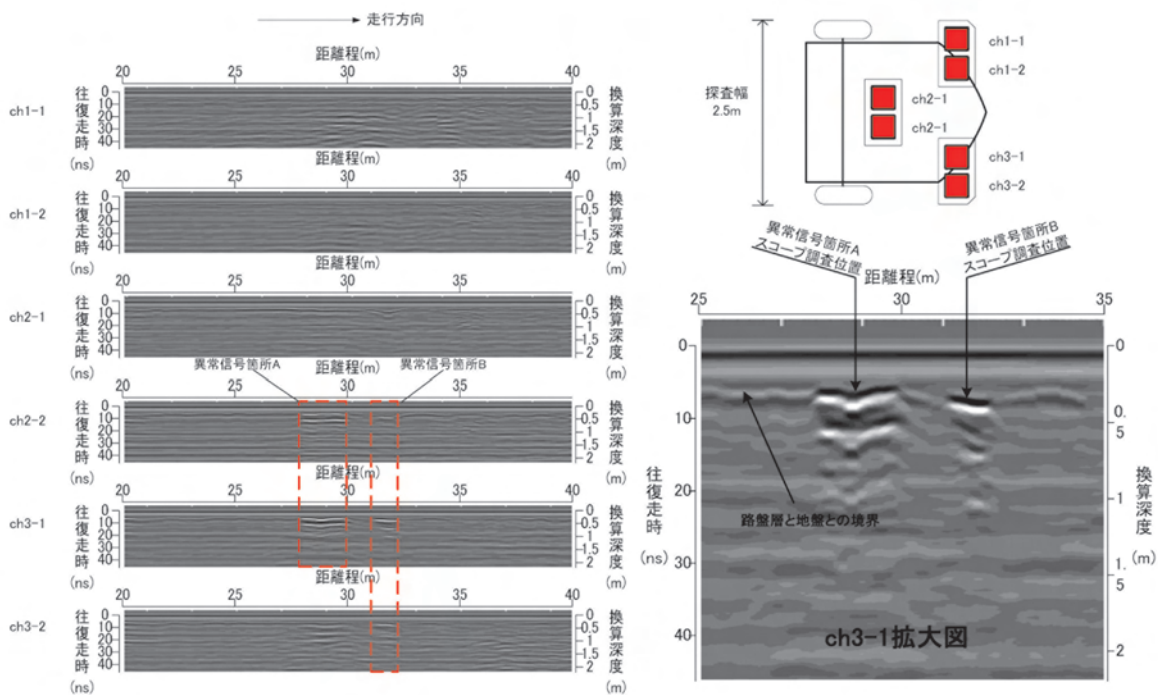


図-3 路面下空洞の測定記録例  
Fig.3 Measurement record example of a cavity under road

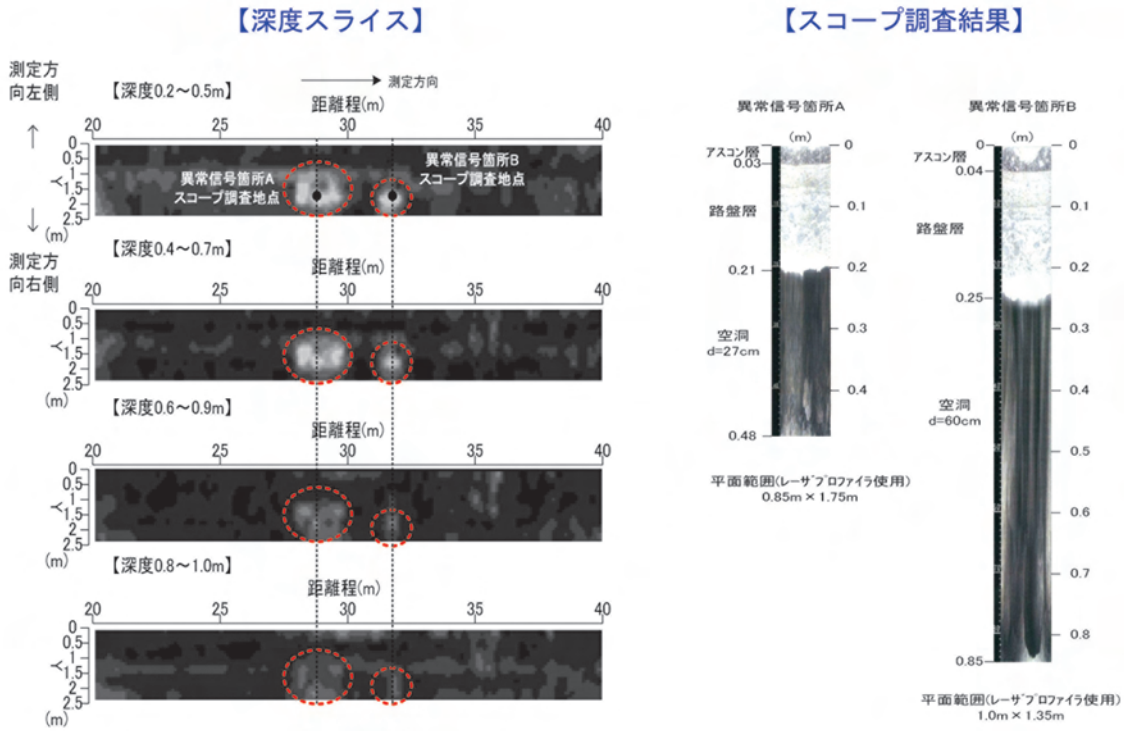


図-4 深度スライス処理結果とスコープ調査結果例  
 Fig.4 Examples of depth-slice processing and results of scope investigation

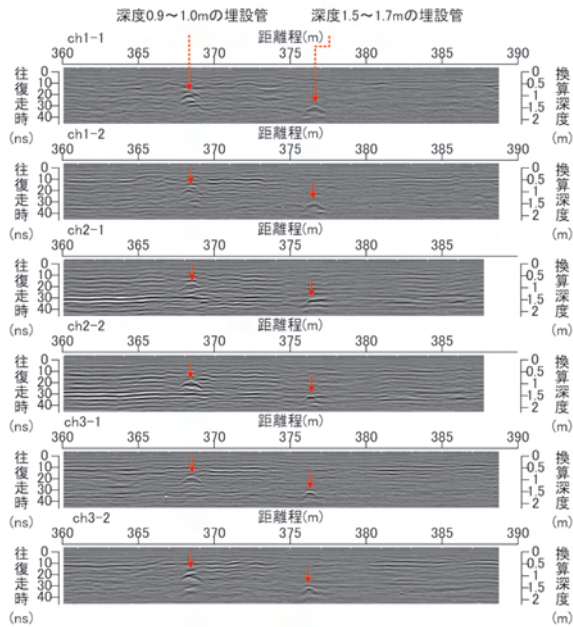


図-5 横断埋設管の検出記録例  
 Fig.5 Example of detecting underground pipes across a road

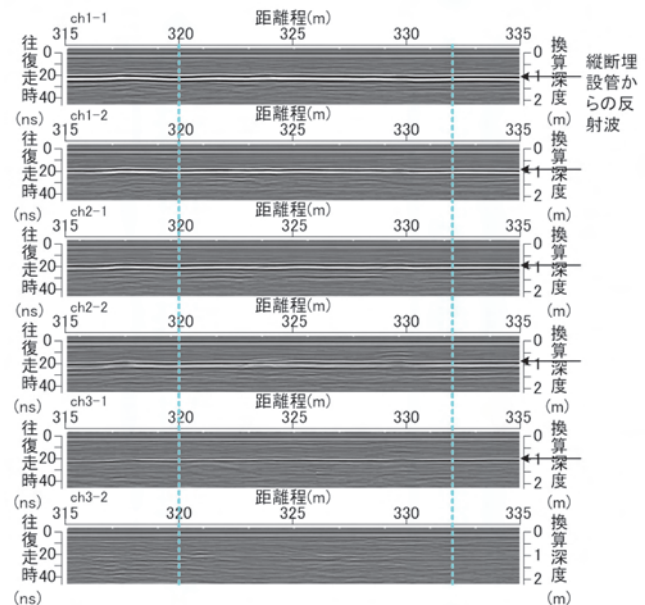


図-6 縦断方向埋設管の検出記録例  
 Fig.6 Example of detecting underground pipes along a road

図-6 に示した測定例では ch1-1, ch1-2, ch2-1, ch2-2, ch3-1 の深度 0.9m 付近にそうした層状の反射波が表れている。単一チャンネルの記録のみでは横断方向の埋設位置が不明瞭であるが、6ch 分の測定記録から特定距離における横断方向の記録を合成すると、概略的な位置を求めることができる。測定例の距離 320m, 332m 付近について合成した横断方向の記録を

図-7 に示す。いずれも ch2-1 が双曲線状反射波の頂点になっており、その付近に埋設管の中心があると判断される。

3.3 舗装厚測定例

中心周波数 2GHz のホーン型アンテナを使用した舗装厚の測定例を図-8 ~ 図-10<sup>2)</sup> に示す。ホーン型アン

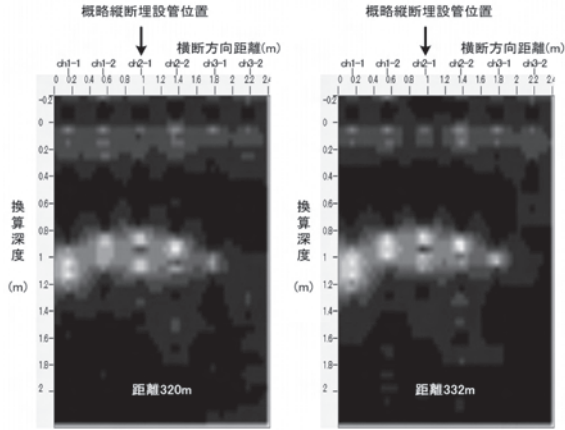


図-7 横方向スライス分析結果  
Fig.7 Cross line-slice record

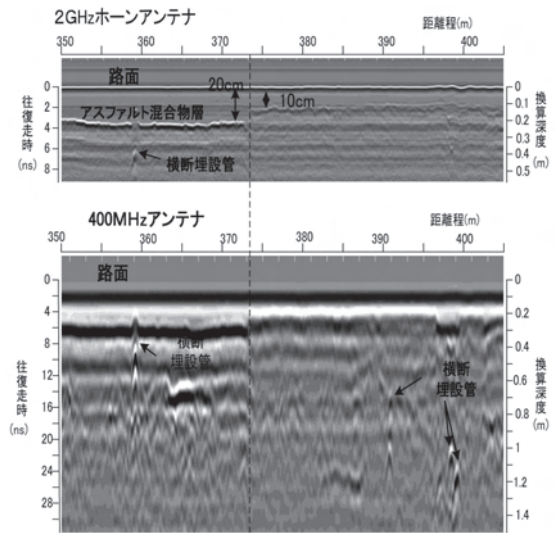


図-9 2GHz ホーン型アンテナと 400MHz アンテナの記録比較例  
Fig.9 Example of comparison between 2GHz horn antenna and 400MHz antenna

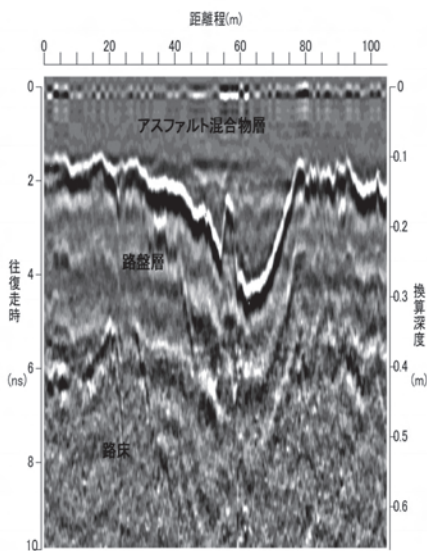


図-8 ホーン型アンテナ記録例  
Fig.8 Example of horn antenna

テナの特徴は、400MHz等のポータ型アンテナと発信機構が異なり、路面から数十cm浮かせた状態でも測定ができる。指向性が強く、2GHzのアンテナでは路面直下の情報を深度0.5～0.7mまで探査する能力がある。

測定記録上で時間的に最初に表れる構造物からの応答が道路表面の反射波で、次にアスファルト混合物層の底面反射波が表れる。層厚は、両者の時間差の半分に電磁波速度を乗じて求めることができる。電磁波速度はコア抜きによる実測結果、金属物と舗装表面との振幅比から求める方法、あるいは一般的な値を仮定する方法がある。

図-10に示す測定例ではアスファルト混合物層の電磁波速度を一般的な値に仮定して求めた層厚を表している。また、測定記録には図-8のように路盤層底面と見られる反射波が表れていたことから、アスファルト混合層底面と路盤層底面との時間差の半分に、路盤層中の電磁波速度を仮定して求めた路盤の層厚も表した。この例では両者ともに15cm前後の層厚になっている。

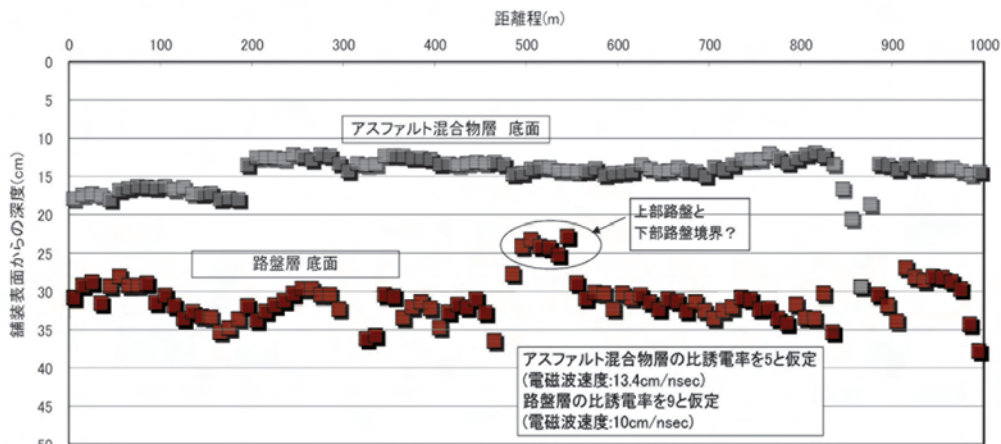


図-10 測定記録から求めたアスファルト混合物層厚、路盤層厚の例

Fig.10 Example of asphalt mixture layer thickness and roadbed layer thickness estimated from 2GHz horn antenna measurement record

表-2 データ処理ソフトの主な機能

Table2 Main features of data processing software

項目	内容
測定記録表示	表示ch数:1~10 カラーパターン:26種類 カラー変換16種類 表示距離範囲:任意設定可能 その他:ch毎の波形表示が可能、ビデオ画像との同期が可能
異常信号箇所	種類(空洞、埋設管等)毎にレイヤを作成し、色、種別(点、四角形)を割り当てて表示。抽出した異常信号箇所は距離、距離範囲、深度、経過時間、ビデオ撮影時刻等とともに別添作成する一覧表に記載
深度スライス表示	同時表示数:2深度 表示値:RMS値、平均値、最大値 計算深度範囲:任意設定可能 カラーパターン:26種類 カラー変換16種類
データ前処理	その他:横断方向の合成記録断面表示機能 増幅率変更、背景除去処理、メディアンフィルタ処理、異常信号箇所自動抽出機能等
ビデオ表示	4分割画像、経過時間表示、任意時刻のスナップショット切出
地図表示	異常信号箇所をWEB地図に表示、走行軌跡をGoogleEarthに表示
結果出力	測定記録、深度スライスのMicrosoft Visio出力、一覧表のExcel出力機能、異常信号箇所周辺記録と画像の切り出し機能等
その他	距離補正機能、同時測定記録の分離機能
動作環境	OS:WindowsXP(SP3)、Windows7 CPU:Core2Duo以上を推奨 RAM:2GB以上を推奨 モニタ:解像度1024×768以上

4. データ処理ソフト

多チャンネルの地中レーダ記録を同時に表示し、空洞の可能性のある異常信号箇所や埋設管等を設定レイヤ毎に抽出したりすることができるデータ処理ソフトを開発した。このソフトでは地中レーダ記録と撮影画

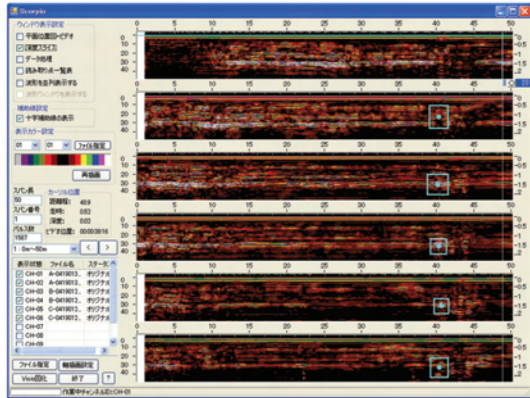


図-11 メイン画面 (記録表示と処理選択)

Fig.11 Screenshot of data processing software (GPR images and processing menus)

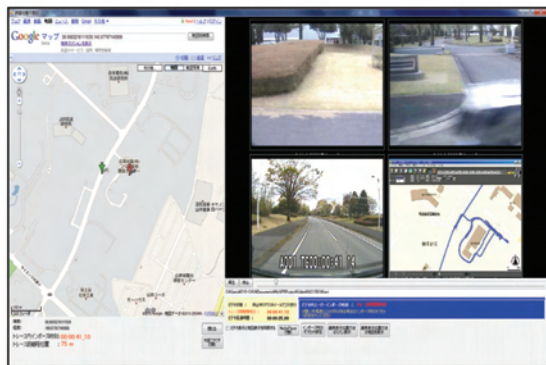


図-13 ビデオ画像とカーナビ画像表示画面

Fig.13 Video image and car navigation view

像、および RTK-GPG による測位情報との同期表示が可能である。

主な機能を表-2に、主要画面を図-11～図-14に示す。本ソフトウェアでは、一回の探査走行で得られた地中レーダ記録、撮影画像、座標情報をまとめたプロジェクトファイルを作成し、設定した距離範囲単位で画面表示や処理を行うことができ、単一のチャンネルごとに個別処理を行うソフトウェアと比較して、短時間で異常信号箇所を抽出することが可能である。これまでの実績では1日当たり2～5km×6ch分の測定記録を扱うことができている。

5. 基礎的検討事項

5.1 測定速度と測定密度

SIR-20と2台の400MHzアンテナを使用して、車速が60km/hの測定においても手引き測定並みの記録密度が確保できるかどうかを検討した。この時、距離計には有効速度範囲を0.2～50km/hに改造した非接触距離計を使用した。

実験では距離700mの直線道路上で、速度を5, 10, 20, 30, 40, 50, 60km/hと変えながら、移動距離5cm毎に2chの波形サンプリングを行って、記録の比較と測定距離の誤差がどのようになるのかを調べた。

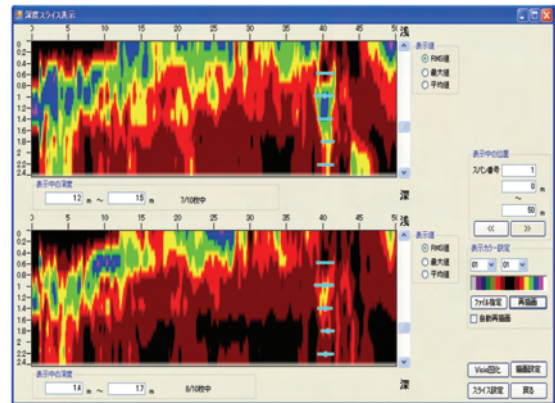


図-12 深度スライス表示と出力方法選択画面

Fig.12 Depth-slice views and choice of outputting methods)



図-14 GPS 走行軌跡及び異常信号箇所の表示画面

Fig.14 Screen of GPS track and positions of detected anomalies

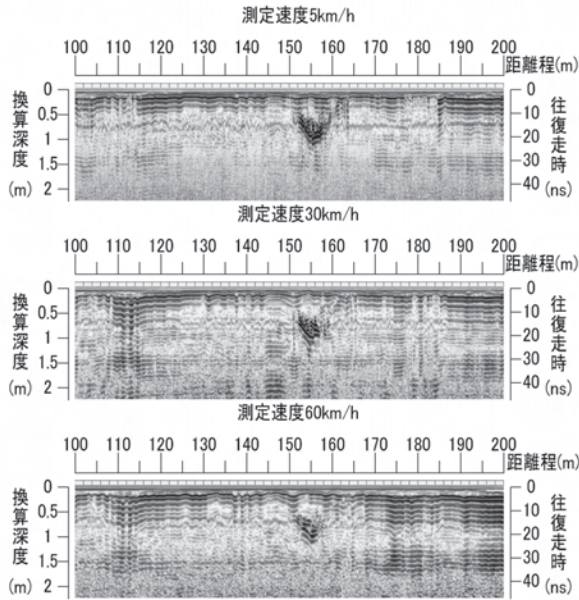


図-15 走行実験記録例  
Fig.15 Examples of GPR data with various run speed

なお、受信波形は16ビットデータが512点になるように設定した。

図-15に時速5km, 30km, 60kmの測定記録を示すが、いずれの走行速度においても距離15m付近のアノマリー(異常信号箇所)を判別できることが判る。また、走行距離700m間の実測距離と測定記録の距離との誤差を図-16に示すが、距離計の有効速度範囲ではいずれも1m以内と高精度になっていることが判った。このように現有の機器においても手引き測定程度の5cm間隔で波形サンプリングできることを確認した。実験にはSIR-20の標準機(最大送信速度100kHz)を用いたが、高速測定用のInternationalシステム(最大送信速度300kHz)を採用することにより、さらに高密度の測定が行えることが判った。

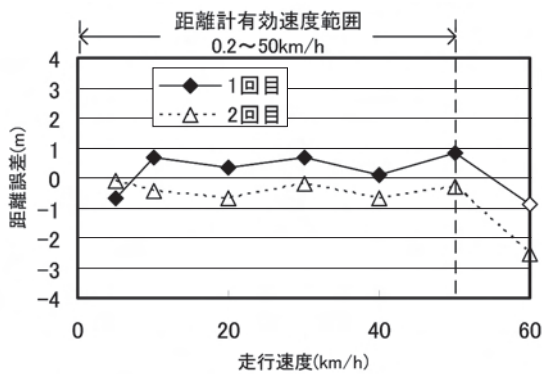


図-16 走行速度と距離誤差との関係  
Fig.16 Relationship between run speed and distance error

5.2 車両位置の検出方法と位置同定精度

測定車の位置情報は、できる限り高精度な位置検出ができるように、前項の実験で確認した非接触距

離計、高精度で位置座標を求められることができるネットワーク型のRTK-GPS及び夜間測定にも対応できる高感度ビデオカメラを搭載した。非接触距離計はより高速測定に対応できるように有効速度範囲を0.3~100km/hに改造した。ここで、ネットワーク型のRTK-GPSは搭載したアンテナによって測定した座標情報を基地局に送信し、同局で求めた固定局の座標情報との間で補正量を計算し、それを車両が受信して位置座標を求める。受信している衛星数や配置が良好であれば数cmの精度になる。さらに、距離計では交差点での右左折、湾曲した道路等の直進道路以外で長距離走行すると累積誤差が大きくなることから、測定を開始してからの経過時間をレーダ記録や位置情報ファイルにも取り込むことにした。この経過時間はビデオカメラ映像にスーパーインポーズされる。これにより、検出した異常信号箇所は距離や位置座標で求めることができるだけでなく、地中レーダ記録と同期したビデオ映像を参照することによっても求めることができる。これらのシステム同期技術については、現在特許出願中<sup>1)</sup>である。これまでに一般道路上で1km間を通常速度で走行した結果、前述の専用データ処理ソフトを用いることにより、概ね1m程度の誤差で異常信号箇所を現地にて同定できることを確認した。

5.3 関係法規

アンテナの車載方式に関して、車両に組み込む方式と別のトレーラ車に組み込む方式の二通りがある。検討した結果、アンテナの周りの金属物を少なくすることができる利点からトレーラ方式を採用することにした。

アンテナをトレーラ車に搭載することにより、適用を受ける法規は以下の車両運送法と電波法であった。

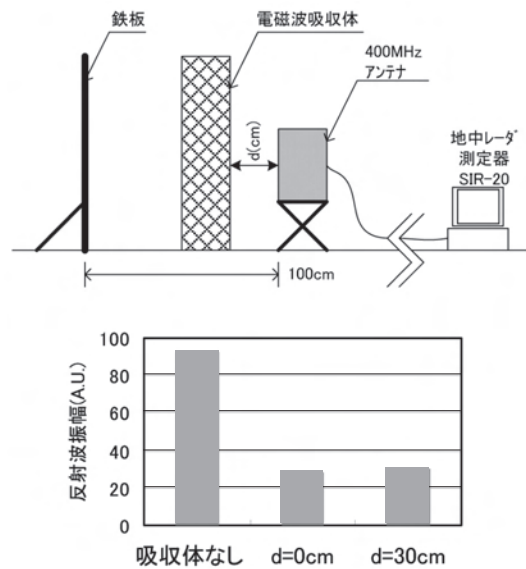


図-17 電磁波吸収体の効果確認実験  
Fig.17 Effect confirmation experiment of EM wave absorber

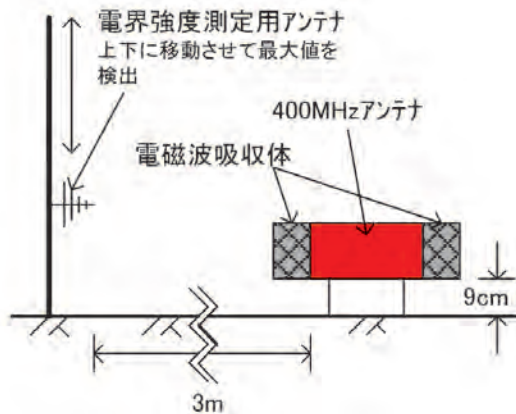


図-18 漏洩電界強度の測定  
Fig.18 Measurement of E-field leak strength

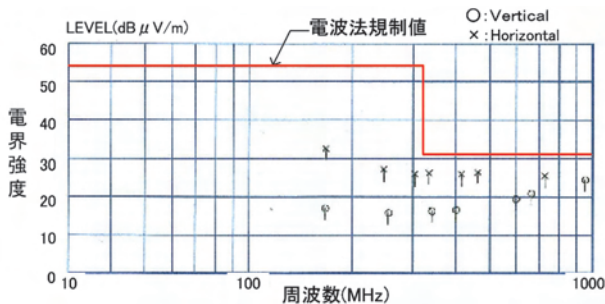


図-19 漏洩電界強度検査結果  
Fig.19 Test result of E-field leak strength

1) 車両運送法第3条 (最低地上高)

【牽引車両の最低地上高は9cm以上なければならない。】

2) 電波法第2章第4条

【許可を要しない微弱無線局は、周波数が322MHz以下で漏洩電界強度が500 μV/m以下、周波数が322MHzより大きく10GHz以下で漏洩電界強度が35 μV/m以下でなければならない。】

法規制上の理由から車両のアンテナの路面高は9cmとしたが、アンテナを路面から浮かせるために、その分空气中に漏洩する分が増えて、漏洩電界強度が電波法の規制値を超える可能性が懸念された。このため、アンテナ周囲に漏洩電波を吸収する電波吸収体を設置した。電波吸収体は、アンテナから外部への電磁波漏洩を防ぐほか、トレーラー車の金属フレームによる電磁波の乱反射ノイズの混入を低減することにも寄与する。

アンテナを囲む電磁波吸収体にはウレタン素材で加工し易く、軽量で、適用周波数帯が400MHzアンテナに最も近いものを使用することにした。電磁波吸収体の効果を確認するために図-17のような実験を行った。実験では鉄板から1m離れた位置にアンテナを置き、アンテナと鉄板の間に吸収材を挟むことにより、鉄板による反射波の振幅がどの程度減衰するのかを調べた。その結果、アンテナに密着させて吸収体を取り付けることにより鉄板による反射波振幅が約1/3に減少し、今回用いたアンテナの電磁波漏洩防止に有効であることが確認できた。

そこで図-18のように400MHzアンテナの側面を電磁波吸収体で囲み、外部検査機関において漏洩電界強度を検査した。その結果、図-19に示すように、漏洩電界強度が規制値以内になり、使用にあたって許可を必要としない微弱無線局として利用できることになった。

5.4 手引き測定と探査車測定との記録比較

開発した路面下探査車ではアンテナが路面から浮いている。この場合、道路表面の反射波や空中に漏洩した成分がトレーラー車の金属物に反射し、それらが地下からの反射波に重複し、不鮮明になる影響が考えられた。

そこで、同一測線を探査車により測定した場合と手引き測定した場合とを比較した。

弊社のつくば建屋周辺の道路を時速20km前後で走行した際の手引き測定と、同じ位置で探査車により測定した記録の比較を図-20に示す。手引き測定ではアンテナが路面に密着している。測定はゲイン、フィルタ等の測定パラメータを同一にして測定したものである。手引き測定に比べると全体的に振幅値がやや小さい傾向はあるものの、地層境界と見られる反射波も明瞭に捉えており、手引き測定に劣らず良好な記録を収録できたと考えている。また探査車測定で懸念していたトレーラー車の金属フレームの影響も、比較的少ない結果が得られたと考える。

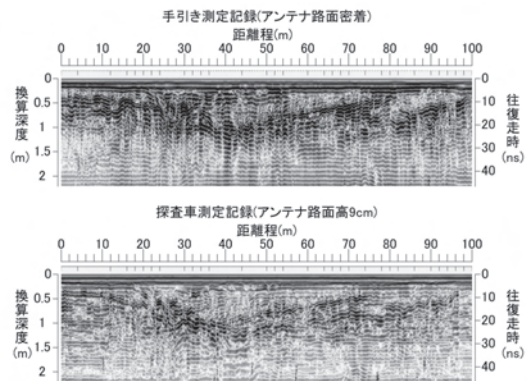


図-20 手引き測定記録(上)と探査車測定記録(下)との比較  
Fig.20 Comparison between man-towing measurement record (above) and measurement record using exploration vehicle (bottom)

5.5 舗装厚測定に関する検討

舗装厚測定は、通常、交通規制の必要がないように、車両による非接触測定が行われる。探査深度は50cm程度と浅くとも良いが、できる限り高分解能な記録を求められ、ホーン型アンテナが利用される場合が多い。

そこで、開発車両ではSIR-20に接続可能なGSSI社のホーン型アンテナの中で中心周波数が最も高い2GHzのものを採用することにした。なお、アンテナの種類が変わっても、400MHzアンテナと同じ収録密度で測定が可能である。

米国でのホーン型アンテナの車載例<sup>3)</sup>を図-21に示





図-21 米国でのホーン型アンテナの車載状況

Fig.21 Car-mounted horn antennas in U.S.

す。ホーンアンテナは400MHz ボータイ型アンテナと比較すると電磁波シールドが施こされておらず、全方位に漏洩することから、このままでは電波法に抵触する可能性があった。そこで400MHz アンテナと同様に電磁波吸収材で側面を囲み、外部検査機関に持ち込み漏洩電界強度を測定した。その結果、漏洩電界強度は路面高30cm 以内であれば規制値以内になり、微弱無線局として取り扱えることになった。本来、このアンテナは路面高50cm 前後が最適な高さになるように調整されているが、舗装道路上で実験した結果、アンテナの路面高を30cm とした測定においても多少反射強度の低下は見られるが、アスファルトと路盤との境界を十分に確認できることがわかった。

## 6. あとがき

2010年6月に路面下探査車「ロードビジュアライザー」を開発し、これまで複数の場所の路面下空洞探査、埋設管探査及び舗装厚測定に適用してきた。本論文ではその一部を紹介したが、今後はさらに適用事例を増やし、それらを通じて、移動体計測に関する知見を蓄積していくことにより、調査信頼性の向上、適用範囲の拡大及び調査に要する時間の短縮を図る所存である。

### 参考文献

- 1) 山下ほか(2010):特願2010-291669「車載型地中レーダ計測装置のシステム同期方法」, 出願中
- 2) 山下ほか(2010):ホーンアンテナを用いた舗装厚調査事例, 第22回非開削技術研究発表会
- 3) GSSI 社ホームページ< <http://www.geophysical.com/> > 【閲覧日2011年3月1日】