

可搬型線路下空洞探査装置の開発



波場 志郎*



齊藤 岳季*

路盤陥没による重大事故を未然に防ぐことを目的として、当社では、線路下空洞探査車により、線路下の空洞の有無を調査している。線路下空洞探査車は、軌陸車タイプで、1台を全支社で定期的に運用しており、測定したデータについては専門技術者が後日確認している。しかし、全支社を定期的に運用する検査車に加えて、急ぎで測定したい時にすぐに対応ができ、状況の確認もできる探査装置へのニーズがあった。そこで、可搬式でリアルタイムに状況の確認が可能な線路下空洞探査装置を開発し、模擬空洞を設置したテストコースや営業線での試験を行った結果、良好な性能を確認することができた。

●キーワード：線路下探査、可搬型、電磁波レーダ

1. はじめに

線路における土構造区間では、以下の要因による路盤陥没の発生が懸念されている（図1）。

- ・ 地中にある導水管の破損により導水管へ土砂が流入する
- ・ アンダーパスなどの工事による何らかの原因により、路盤下に空隙が発生する
- ・ 地下水の漏水などの影響により路盤下に空隙が発生する



図1 路盤陥没発生状況

線路下を目視するためには試掘が必要となり、陥没前に危険箇所を見つけ出すのは難しい状況である。そこで、危険箇所を探査する手法として、埋設物の種類に制約されない電磁波レーダ探査が有効とされている。

当社では、電磁波レーダ技術を活用した線路下空洞探査車を開発し、全支社で運用している。しかし、全支社を定期的に運用する検査車に加え、路盤陥没発生時の類似箇所調査など急ぎで測定したい時にすぐに対応ができ、状況の確認もできる探査装置へのニーズがあった。そこで、持ち運びができタイムリーに測定ができる可搬型線路下空洞探査装置の開発を行った。

2. 電磁波レーダの探査原理

電磁波レーダは、図2に示すように、送信アンテナより地中に向けて電磁波（点線）を発信し、周囲の土と電気的特性（比誘電率）の異なる物質、例えば空洞や埋設物などの表面で反射されて返ってくる電磁波を受信アンテナで受け、送信から受信までの時間から反射物体までの距離を測る。なお図では、説明のために送受信の電磁波は角度を持って描いているが、実際には角度は微小であり直線的な送受信となる。

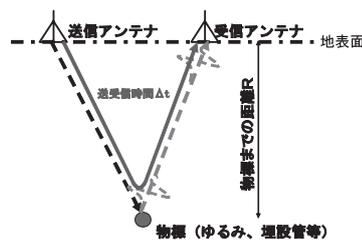


図2 探査原理

地表から物標までの距離をR、電磁波の送受信時間をΔtとするとRとΔtには次の関係がある。

$$R = V \times \frac{\Delta t}{2}$$

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

ここで、Vは地中での伝播速度（アンテナから放射した電磁波が土の中を進む速度）であり、真空中の伝播速度C₀（3×10⁸m/sec）を土などの比誘電率であるε_r（測定場所の土質により決定する）の平方根で除したものになる。した

がって、比誘電率が大きい物質ほど伝播速度が小さくなるといえる。一般的な物質に対する比誘電率を表1に示す。

表1 各物質における比誘電率

物質	比誘電率
空気	1.00059
水	81
土	乾地 2.5~4
	湿地 14~30
コンクリート	4~12

3. 線路下空洞探査車(UTRAS)の概要

当社では、電磁波レーダ技術を活用した線路下空洞探査車(UTRAS [アトラス]: Under-track survey car) 1台を全支社で運用している(図3)。



図3 線路下空洞探査車

定期的に運用する検査車として有用な線路下空洞探査車で、以下の特徴を有している。

- ① 1台を全支社で定期的に運用していることから、路盤陥没発生時の類似箇所調査など急ぎで測定したい時に、遠方の支社にて運用していた場合、対応が困難である。
- ② 軌陸車タイプであり、一定の大きさをもつ踏切でなければ線路への載線ができないことから、複数の線を計測したい場合、探査路線の変更のために踏切まで戻って別の線に載線させる必要があり、時間ロスが生じる。
- ③ 測定したデータについては、専門的に解析する必要があり、専門技術者が後日確認して報告することとなっている。そのため、測定から結果確認までに時間を要し、結果報告により異常と想定された箇所について再度現地調査を実施する必要が生じている。

4. 可搬型線路下空洞探査装置の開発仕様

可搬型線路下空洞探査装置は、現場ニーズなどから以下の仕様を定めて開発を進めた。

- ① 可搬式とし2名での運搬が可能

- ② マクラギの影響を極力受けない
- ③ 深度2mまで対応可能
- ④ 測定時にモニターで状況の確認ができる
- ⑤ 軌間外測定、線路外測定が可能

なお、深度を2mまで対応可能としたのは、ここ数年において陥没事故の発生源がほぼ2m以内であったことによる。

線路下空洞探査車と今回の開発仕様の比較を表2に示す。線路下空洞探査車と大きく異なっている特徴としては、装置を人力走行の可搬型とし、リアルタイム確認機能があるという点である。

表2 探査装置の比較

項目	線路下空洞探査車		可搬型装置(軌間内外)
	(軌間内)	(軌間外)	
アンテナ構成	送信: 1台 受信: 2台	送信: 1台 受信: 1台	送信: 2台 受信: 2台
探査可能深度	2m	3m	2m
アンテナ周波数	1000MHz	730MHz	1000MHz, 1500MHz
周波数切替		無	有
探査速度	2km/h		2km/h
リアルタイム確認		無	有
測定方式		軌陸車	人力

5. 可搬型線路下空洞探査装置の主な特徴

可搬型空洞探査装置の測定状況を図4に、アンテナ配置を図5に示す。

以下に、主な特徴について紹介する。

5.1 可搬式のため2名での運搬が可能

試作した探査装置の総重量は約40kgであり、2人で運搬が可能である。線路下空洞探査車は大きな踏切から載線させていたのに対し、可搬型線路下空洞探査装置は、側道などから簡単に載線ができる。



図4 可搬型線路下空洞探査装置による測定状況

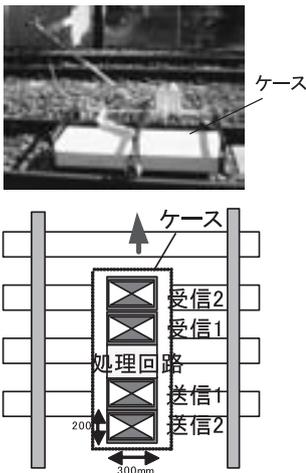


図5 可搬型線路下空洞探査装置のアンテナ配置

5.2 マクラギの影響を極力受けない

主な測定対象が線路であり、マクラギ上を測定していくこととなるため、送受信アンテナが1台ずつの場合、アンテナとマクラギの位置が重なり、電磁波がマクラギで反射してしまうおそれがある (図6)。

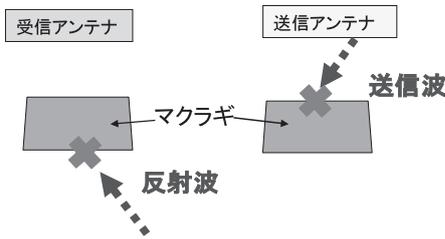


図6 マクラギの影響

そのため、一方のアンテナがマクラギに重なってしまっても、もう一方のアンテナで送受信させることを目的として、送信用2台、受信用2台の計4台の探査アンテナを搭載している (図5)。

4台のアンテナを搭載することにより図7に示すとおり、マクラギの影響を受けずに探査することが可能となる。

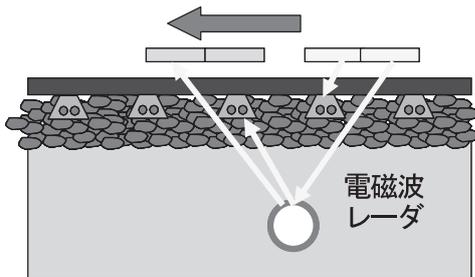


図7 マクラギの影響をかわした探査

5.3 深度2mまでに対応

電磁波レーダには表3に示す相対的な特性がある。

表3 レーダの相対的な特性

周波数	解像度	探査深度
高い	◎	浅い
低い	○	深い

今回開発した可搬型線路下空洞探査装置の開発仕様の1つに、「深度2mまで対応」とあるが、より高い周波数の電磁波レーダは、低い周波数に比べて解像度は良いが探査深度が浅いという特性がある。一方、より低い周波数の電磁波レーダは高い周波数に比べて解像度は優れないが、より深くまで探査可能な特性がある。そこで、それぞれの電磁波レーダの強みを活かすため、深度1m用のレーダとして1500MHz、深度2m用のレーダとして1000MHzの2つの電磁波レーダを回路で切替え、2台の送信アンテナから交互に送信させることとした。

電磁波レーダの送信サイクルは以下のとおりである (図8)。

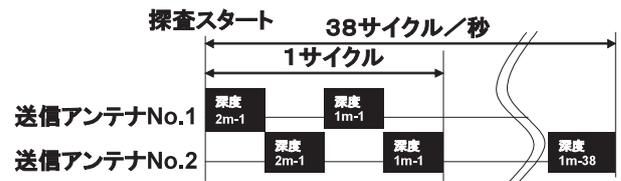


図8 電磁波レーダの送信サイクル

①送信アンテナNo.1から深度2m用の1000MHzの電磁波を発信し、②送信アンテナNo.2から深度2m用の電磁波を発信する。③その後回路で周波数を切替えて送信アンテナNo.1から深度1m用の1500MHzの電磁波を発信し、④送信アンテナNo.2から深度1m用の電磁波を発信する。なお、上記①から④までを1サイクルとして、1秒間に38サイクルの周期で電磁波レーダを発信させる。

5.4 モニタで状況の確認ができる

測定状況画面を図9に示す。これは検査者が探査装置を走行させながら確認するモニタの画像である。

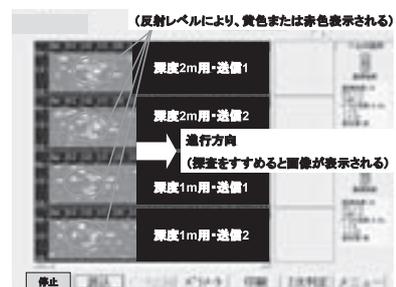


図9 測定状況画面 (リアルタイム確認)

図では探査状況画像が縦に4つ並んで表示されている。これは、5.3で述べたとおり、深度2m用と1m用の2つの周波数の電磁波レーダを2台の送信アンテナから送信させているため

- ① 深度2m用・送信1
- ② 深度2m用・送信2
- ③ 深度1m用・送信1
- ④ 深度1m用・送信2

の4つの画面を表示させている。

なお、同じ周波数であれば画像合成をすることが可能であるが、リアルタイムで各周波数の画像を合成処理することができないため、測定中は4つの画像を表示させている。なお、計測完了後では深度1m用と深度2m用の画像を合成処理して出力することが可能である（図10）。

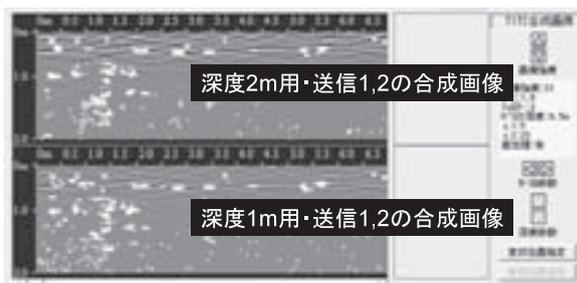


図10 測定結果画面（各周波数の合成画像）

各画像の縦軸は探査深度、横軸は探査スタート地点からの距離を表示している。検査スタート時は画像が表示されない状態であるが、検査を進めていくことにより距離に応じて画像が右方向に表示されていく。

リアルタイムに状況を確認できる機能として、解析ソフトウェアにあらかじめ設定されたしきい値を越える反射波を受信した場合には、受信レベルに応じて黄色、赤色のマーキングを行い画面表示することとした。これにより、検査者がモニタ画面で広範囲の黄色表示、赤色表示を確認した場合は、測定時の現地の状況確認などを行うことができ、線路下空洞探査車では不可能である初動対応をとることが可能である。

5.5 軌間外測定、線路外測定が可能

探査装置は、軌間内を両輪走行させることを基本としているが、軌間外を測定するときなど、バッテリーをカウンターウェイトとすることにより、片輪走行も可能な機構としている（図11）。



図11 軌間外測定状況

また、電磁波レーダ探査は極力アンテナを検査対象物に接近させることにより精度の高い検測が可能となるため、レール上の測定においてできるかぎりマクラギ上面にアンテナを近づける機構としているが、台車とアンテナを結合する部品を図12のように交換することにより、ホームや駅前広場など線路外の測定にも対応することができる機構としている（図13）。

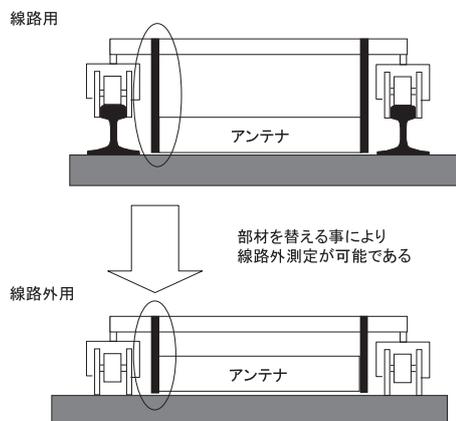


図12 線路用と線路外用の部品交換



図13 ホーム上測定状況

6. 性能確認試験

開発した探査装置の性能を検証するため、模擬空洞を設置したテストコースや営業線において確認試験を実施するとともに、試験にて空洞などの可能性を発見した箇所について、対策工施工後の確認測定も行った。

6.1 テストコース性能確認試験

性能確認試験のため、空洞を模擬化したものとして空気の比誘電率に近い発泡スチロールやコンクリート製のU字側溝を埋設してテストコースを作成した。各モデル一覧を表4に示す。

図14はモデル②～⑤の埋設状況である。これは空洞をモデル化したものとして、発泡スチロールを路盤中に埋設している。

表4 線路テストコース埋設物表

モデル番号	名称	材料	サイズ
①	空洞	発泡スチロール	W700×D500×H500
②	空洞	発泡スチロール	W500×D500×H300
③	空洞	発泡スチロール	W300×D300×H300
④	空洞	発泡スチロール	W300×D300×H200
⑤	空洞	発泡スチロール	W300×D300×H200
⑥	空洞	発泡スチロール	300×600×1000の三角柱
⑦	構造物	コンクリート	W600×H600×L2000のU字側溝
⑧	ゆるみ	発泡スチロールと発生土	W1000×D1000×H300cm



図14 モデル埋設状況 (モデル②～⑤)

テストコース断面図を図15、調査結果の画像を図16に示す。図の最も左側の空洞モデルがモデル①であり、探査は右方向に向かって測定した結果である。

これらの結果をみると、空洞モデル①から⑧まで埋設物位置と同様な傾向で探知しており、良好な性能を有していることが分かった。なお、図16において画面中央の2m付近に垂直に出ている反射波は、ノイズによるものである。

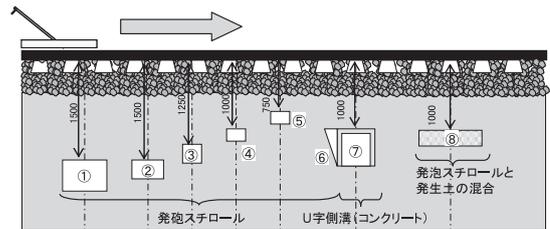


図15 テストコース探査断面図

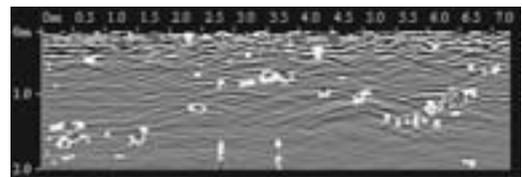


図16 テストコース探査結果画像

6.2 営業線性能確認試験

探査装置の営業線での性能を検証した。調査結果画像の概要図を図17に示す。当該区間には、導水管など探査で明瞭な反射の想定ができる設備が存在した。

調査結果画像を図17に、また金属防護マクラギ、導水管付近の拡大図を図18～20に示す。

図18は、金属防護マクラギ位置における拡大画像である。防護マクラギ箇所においては、金属の反射が明瞭に出力された。

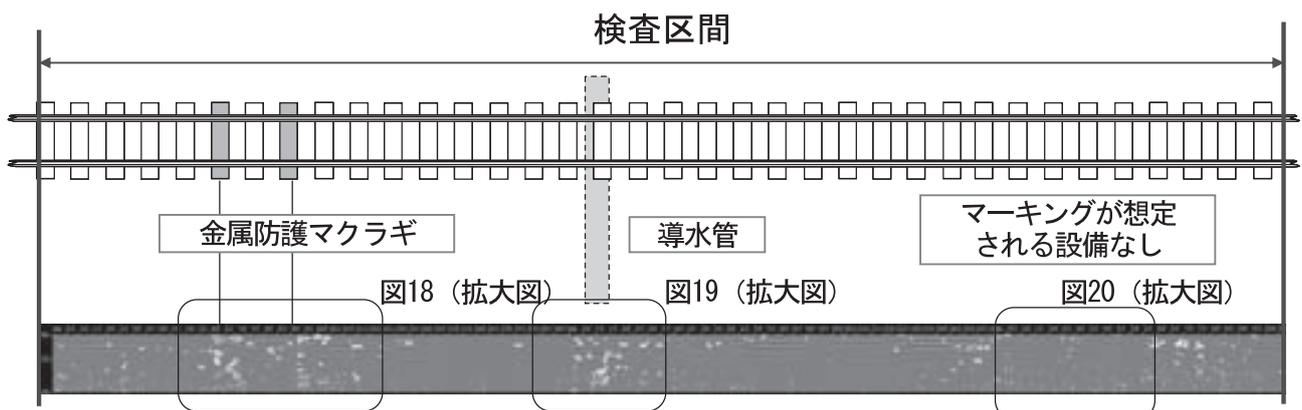


図17 営業線試験箇所概要図および探査結果画像の全体図

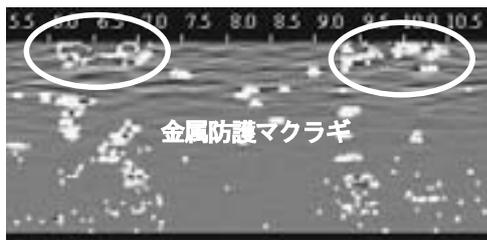


図18 金属防護マクラギ付近の探査画像

図19は、深度1mに敷設された導水管の位置における画像である。図に示すとおりこちらも反射波が明瞭に出力され、探査深度については1m付近と正確に出力された。

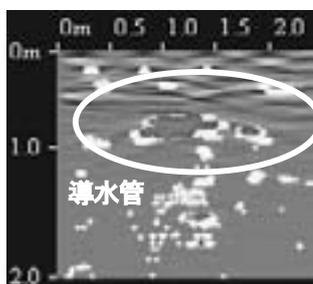


図19 導水管付近の探査画像

導水管より右側の区間は、特に強い反射波が想定された設備はなく、探査画像についても反射波が明瞭に出力された箇所が見られなかった。図20は、明瞭な反射波が見られない画像の例として掲載する。

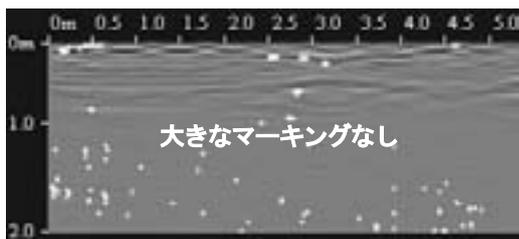


図20 導水管より右側の区間の探査画像

6.3 対策工施工後の確認

ある区間において試験的に探査を実施したところ、図21に示すように、広範囲のマーキングが確認され、空洞の可能性を確認することができた。

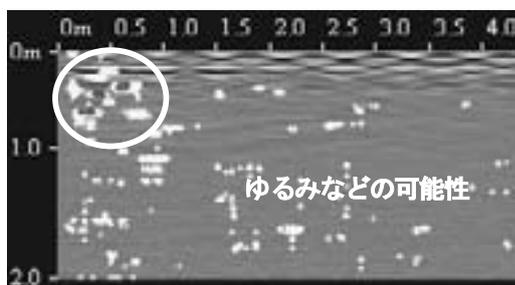


図21 対策工施工前の探査結果

当該区間について、碎石を投入しながらH型鋼を振動挿入させる対策工を施工した後に、再度同区間を探査した。その結果、対策工施工前に比べマーキング箇所が減少し、対策工の効果と空洞の可能性の減少について確認することができた（図22）。

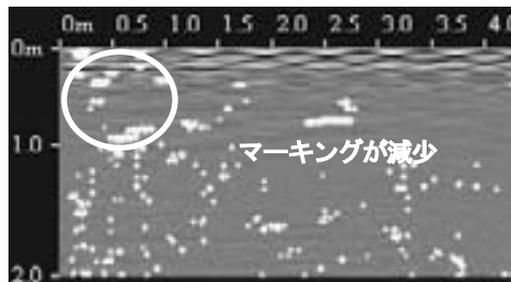


図22 対策工施工後の探査結果

7. まとめ

全支社で運用している線路下空洞探査車の状況と現場のニーズを踏まえ、以下の特徴をもつ可搬型空洞探査装置の開発を行い、各種試験において良好な性能を確認することができた。

- ① 総重量約40kgであり、2人での運搬が可能で側道からの搬入搬出など測定準備が容易にできる
- ② 送信2台、受信2台のアンテナを使い分けることにより、マクラギの影響を極力受けにくい
- ③ アンテナを変えることなく、回路を切替えることにより2つの周波数を用いた効果的な測定が可能である
- ④ 測定しながら、手元のモニターで状況の確認が可能である
- ⑤ 軌間外測定、線路外測定が可能である

今後は導入に向けて、実現場において試験運用を行いながら可搬型としての有用性、計測の準備やソフトの操作性などの検証を行っていききたい。

参考文献

- 1) 熊澤孝夫：三次元検知が可能な地中埋設物レーダ、センサ技術、1993.2
- 2) 村沢観治ほか：3アンテナ素子を有する地中埋設物探査レーダ、三井造船技報、1994.6
- 2) 長谷川祐二ほか：線路下空洞探査車（UTRAS）の導入、日本鉄道施設協会誌、2001.2