

# 歩道下空洞探査車の開発

持丸 修一・田中 義光・雨宮 圭吾

社会資本整備の一環として、電気、ガス、上下水道などのライフラインの地下埋設が積極的に進められている。この結果、歩道部においても大規模な陥没が発生し、歩道の安全かつ円滑な通行確保が求められるようになった。

筆者らは、歩道部の空洞探査を効率的に行うため、路面下空洞探査技術（地中レーダ技術）を活用した歩道用の空洞探査車を開発した。本探査車は、探査深度 80 cm、探査幅 1 m、探査能力  $30 \times 30 \times 7$  cm の空洞を認識可能、探査速度 5 km/h の能力を有する。

キーワード：診断技術、非破壊検査、地中レーダ技術、空洞探査、歩道

## 1. はじめに

社会資本整備の一環として、電気、ガス、上下水道などのライフラインの地下埋設が積極的に進められている。この結果、埋設物の施工不良、地盤沈下、老朽化などによると思われる空洞が生じ路面陥没が多発している。

平成 2 年度より道路調査車（路面下空洞探査車）を用いて路面の空洞調査が実施され、平成 13 年度末までに国土交通省関東地方整備局管内の車線延長 5,750 km を調査した結果、500 箇所以上の空洞が発見され、路面陥没の防止に大きく寄与している。

一方、歩道部においても、過去に路面陥没が発生していたが、通行に支障のない程度のものであったことから、本格的な空洞調査は実施されていなかった。しかし、平成 11 年 7 月に都内の国道の歩道部に大規模な陥没（深さ約 0.8 m、幅 1.2 m、長さ 2.4 m）が発生し、歩道の安全かつ円滑な通行確保が求められるようになった。

本報文は、歩道部の空洞探査を効率的に行うため、路面下空洞探査技術（地中レーダ技術）を活用した歩道用の空洞探査車の開発内容について報告する。

## 2. 地中レーダの原理

アンテナより放射された電磁波は、伝播する媒質中の電氣的性質の違いによってその速度が異なるため、電氣的性質の異なる境界において反射波

に時間的な遅れ（差）が生じる。

一般に物質中での電磁波速度は、空気中の秒速約 30 万 km に対し、1/3 程度であることから物質中での電磁波速度を用いて時間を距離に変換すれば、実際の層状態が把握できる。

電磁波の反射強度は、反射境界を形成する 2 つの層の比誘電率のコントラストの差異に依存するため全物質中最小の値をもつ空洞（空気中）が地中にある場合、反射強度は非常に強くなる。また、電磁波は比誘電率の小さな物質から大きな物質に入射すると反射波の極性は反転（負の極性）する一方、逆に大きな物質から小さな物質に入射するときは極性は反転しない。このような電磁波の性質（強度と極性の特徴）を利用して地中内部の判読を行う。図-1 に反射波の発生原理図を、図-2 に反射波の記録表示を示す。

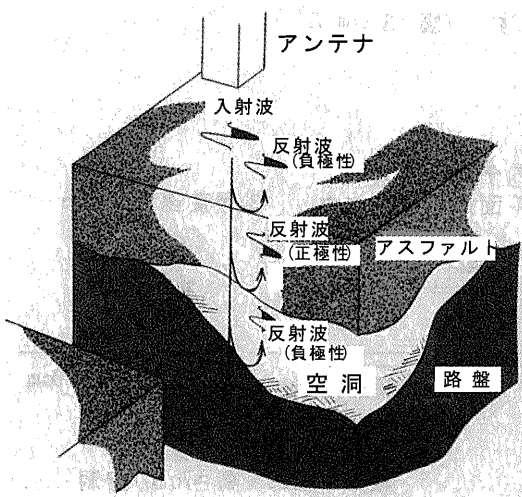


図-1 反射波の発生原理図

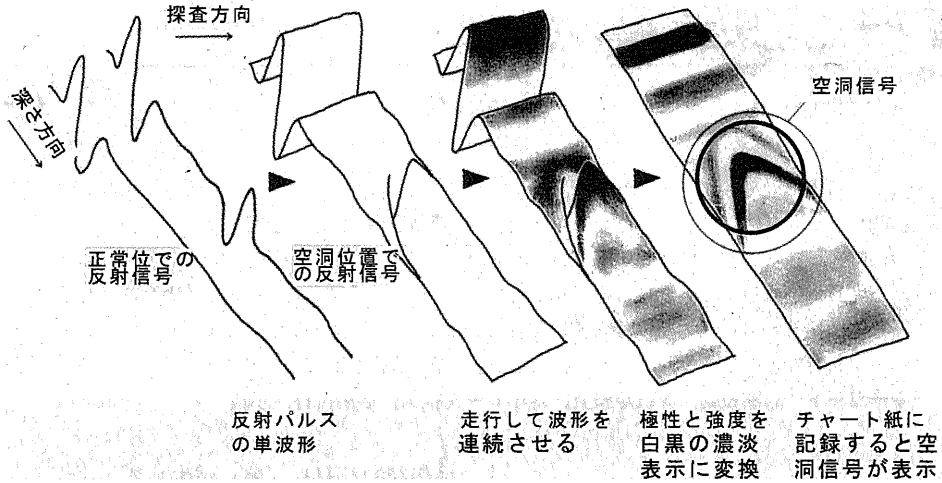


図-2 反射波の記録表示

### 3. 開発目標

開発目標は、都内で発生した空洞を原因とする陥没事例より、歩道部において陥落の可能性がある空洞を発見できるように、

- ① 探査深度：80 cm,
- ② 探査幅：1.0 m,
- ③ 探査速度：5 km/h,
- ④ ベースマシン：自走、搭乗式,
- ⑤ 探査能力：30×30×7 cm 以上の空洞を認識可能,
- ⑥ データ処理：断面、平面表示、位置記録、平面形状をモニタできるもの、とする（図-3 参照）。

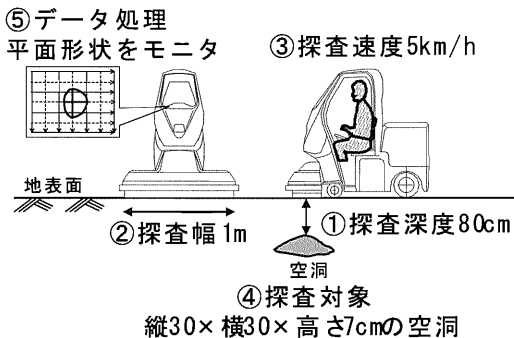


図-3 開発目標

### 4. 要素試験

#### (1) 探査能力試験

探査能力試験は、定量的な探査が行えるよう図-4 に示す国土交通省関東地方整備局関東技術事務所構内において歩道下に設けられた疑似空洞および埋設配管を利用し実施した。レーダは、一般的に発信周波数が高いと解像度が増すが、深さ方向の探査能力が下がることから2種類の中心周

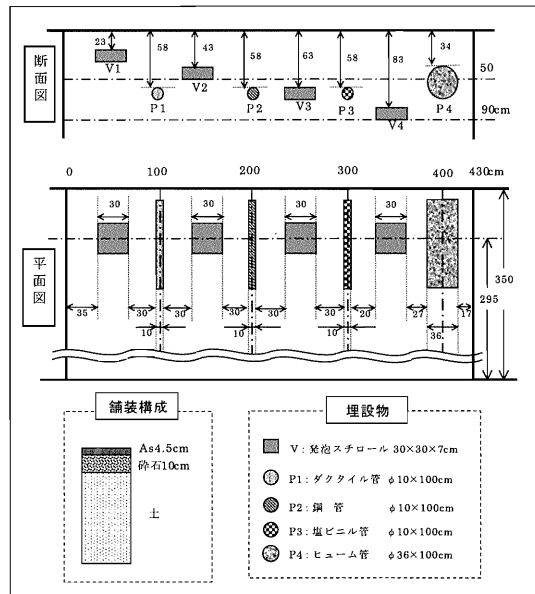


図-4 疑似空洞・配管レイアウト

波数帯 (500 MHz, 800 MHz) およびエアギャップ (路面とアンテナの間隔 4 cm, 8 cm) を変化させ、探査能力の違いを確認した。

周波数とエアギャップの組合せによる試験結果を表一に、各周波数のチャート出力結果を図一

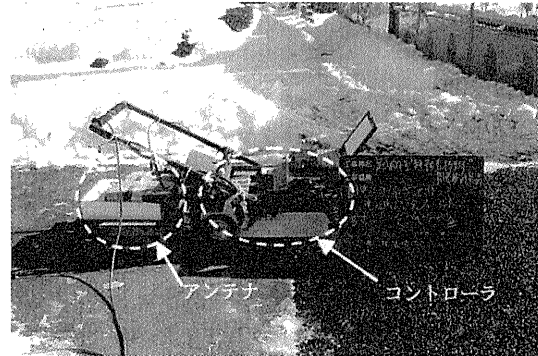
表一 周波数, エアギャップ組合せ試験結果

アンテナ	エアギャップ	埋設物							
		V1	V2	V3	V4	P1	P2	P3	P4
ANT 500 MHz	4 cm	○	○	○	○	○	○	○	○
	8 cm	○	○	○	○	○	○	○	○
ANT 800 MHz	4 cm	○	○	○	○	○	○	○	○
	8 cm	○	△	○	△	△	△	△	△

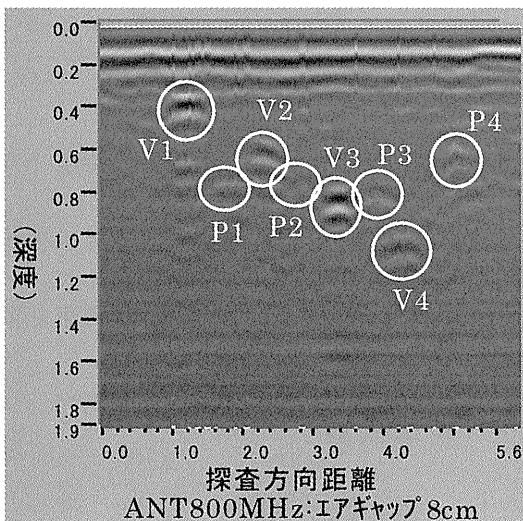
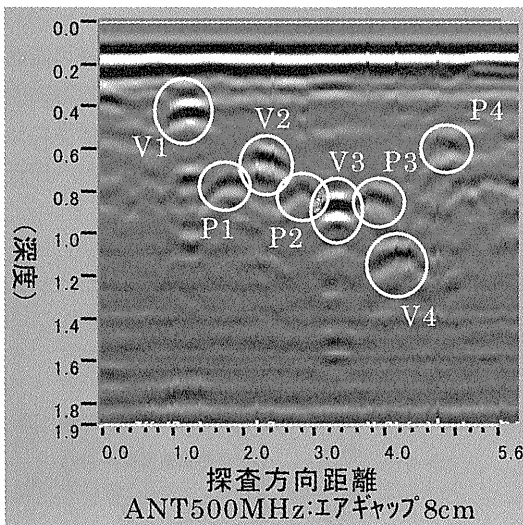
○ : 明確に検知可 △ : 検知可

5 に、試験状況を写真一に示す。

試験結果より、周波数は 500 MHz, エアギャップは探査車の段差乗越え等を考慮して 8 cm の組合せが最も良好な結果となった。



写真一 試験状況



図一五 エアギャップ 8 cm におけるチャート出力

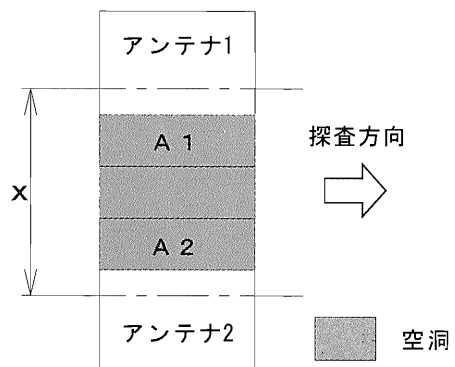
(2) 3 測線同時測定基礎試験

開発目標である縦 30 cm, 横 30 cm の空洞を高精度にモニタするために、最適なアンテナ間隔 (以後「測線間隔」という) を決定するための試験を行った。

(a) 測線間隔試験

測線間隔試験は、図一六に示すように縦 30 cm × 横 30 cm の空洞を 2 つのアンテナを使って検知する試験で、2 つの測線間隔  $X$  は、30 cm, 40 cm, 50 cm とした。

表一に測線間隔試験の結果を示す。反射部分比率 ( $R$ ) は、2 つのアンテナがダイレクトにどの程度空洞を捕捉できたかを数値化したものである。試験結果より、アンテナの設置間隔は 40 cm が適当であることが明らかとなった。



図一六 測線間隔試験の概略図

表一2 測線間隔試験結果

測線間隔	アンテナ台数	反射部分比率	AMT 500 MHz	AMT 800 MHz
30 cm	2台 (ANT2)	$R=100\%$ , $r=50\%$	○	○
40 cm	2台 (ANT2)	$R=67\%$ , $r=34\%$	○	△
50 cm	2台 (ANT2)	$R=34\%$ , $r=17\%$	×	×

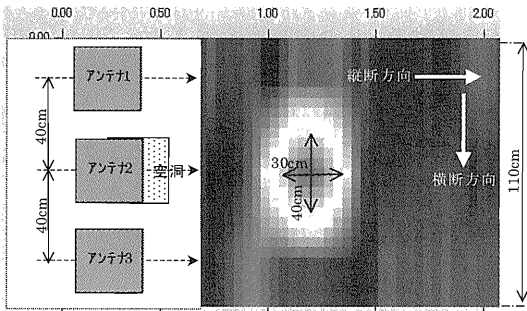
R: アンテナ2台による反射部分比率,  
r: アンテナ1台分の反射部分比率,  
○: 明確に検知可,  
△: 検知可,  
×: 検知不可

(b) 平面処理試験

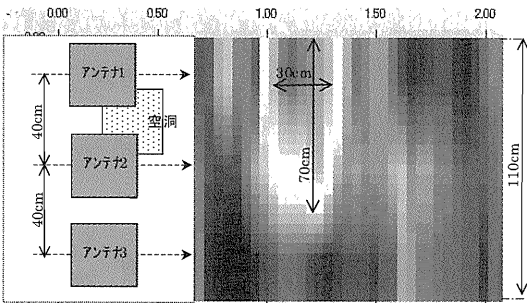
従来の路面下空洞探査ではチャート出力による断面的な状況把握が一次探査結果とされていたが、本開発では3つのアンテナにより得られる3データを合成し、

- ・計測距離、
- ・深度、
- ・探査幅、

の要素で3次元データを形成し、任意の深度における対象物の平面形状を把握することを可能とした2次元表示処理ソフトウェアを開発した。ここで、3つのアンテナを使って得られる3データを合成し、平面形状を把握するとともに測線間隔と



図一7 2次元処理データ (アンテナ直下)



図一8 2次元処理データ (アンテナ2台中間)

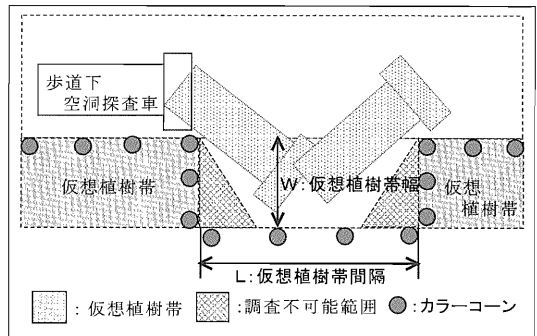
空洞に対するアンテナの通過位置の違いによる処理能力を判定する試験を行った。

図一7、図一8に、500 MHzによるV1の2次元処理結果を示す。縦断方向のデータ処理単位は、高精度な処理を行うため4cm間隔とし、図中における色分けは反射電波の強いものから赤、黄、白、グレー、黒で表され、25%づつ反射強度が弱くなることを示す。

試験結果としては、図一8に示すように2つのアンテナの間に空洞がある場合、横断方向の大きさは正しく表示されないが、開発目標となる30cmの空洞は間違いなく捉えることができ、十分実用に対応できるといえる。

(3) 障害物回避試験

植樹帯などの障害物がある場所での探査可能面積を調査するため、図一9に示すような障害物回避試験を、アンテナ2台一体型と3台一体型について行った。この結果、3台一体型の方が、探査可能面積が大きかった。



図一9 障害物回避試験の概要

4. 歩道下空洞探査車 (実機) の製作

要素試験の結果を踏襲し、表一3に示す歩道下空洞探査車の諸元を決定し、実機を製作した。

写真一2に今回製作した歩道下空洞探査車を示す。

5. 現場試験

(1) 空洞判定能力試験

東京国道工事事務所管内で発見された3箇所の

表-3 基本仕様

① 車両形式	搭乗式電動四輪車
② 探査方式	電磁波地中レーダ方式
③ 地中レーダ	3台一体型と2台一体型(中心周波数500MHz)
④ 信号処理機器	地中レーダで収集したデータを収録・表示する機器
⑤ 探査幅	1.0m(3台一体型の場合)
⑥ 探査速度	5km/h(自走式)
⑦ 最大探査深度	0.8m以上
⑧ 探査能力	30cm(縦)×30cm(横)×7cm(厚さ)以上の空洞
⑨ 駆動電源	シール鉛蓄電池(車両駆動部), 発動発電機(探査装置部)
⑩ 連続走行距離	25km以上(速度5km/h, 平坦路)
⑪ 連続走行駆動時間	7h以上
⑫ 登坂能力	8%以上
⑬ 溝乗越え幅	100mm
⑭ 最小回転半径	2.1m以下
⑮ 車両総重量	350kg未満
⑯ 車両寸法	全長1,950mm, 全幅1,180mm, 全高1,000mm
⑰ 安全装置	歩行者等に注意を促すための警告音と回転灯
⑱ アンテナ懸架装置	ベース車両と地中レーダの3台一体型と2台一体型が取付け・取外し可能とし, 路面の不陸に対する回避装置
⑲ 探査仕様方法	3測線又は2測線同時測定
⑳ マーキング装置	風化型チョークを用いた自動マーキング機構を備えた装置



写真-3 現場試験状況

表-4 各調査データ比較結果

調査箇所	データ種別	縦方向(m)	横方向(m)	厚さ(m)	深度(m)
No.1	ハンディ型レーダ	0.41	0.47	—	—
	歩道下空洞探査車	0.20	0.30	—	0.20
	開削	0.41	0.47	0.11	0.17
No.2	ハンディ型レーダ	0.90	0.50	—	—
	歩道下空洞探査車	0.70	1以上	—	0.60
	開削	*	*	—	*
No.3	ハンディ型レーダ	0.60	0.52	—	—
	歩道下空洞探査車	0.70	0.70	—	0.40
	開削	0.60	0.52	0.18	0.19

\* 開削調査時崩落により調査不可



写真-2 歩道下空洞探査車

空洞を対象に、歩道下空洞探査車による調査を行い、事前に行われたハンディ型レーダおよび開削による調査結果との比較を行った。

本探査車による現場試験状況を写真-3に、各調査データの比較結果を表-4に示す。

ハンディ型レーダでは、図-10に示すように空洞位置が発見でき、メッシュ調査により縦横の大きさが開削結果と同程度に探査できるが、深度については明確でない。

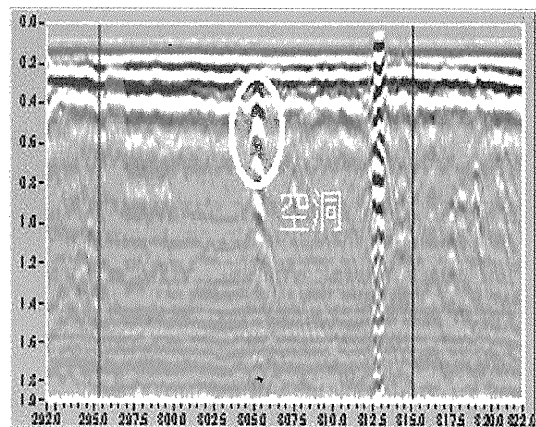


図-10 ハンディ型レーダ結果

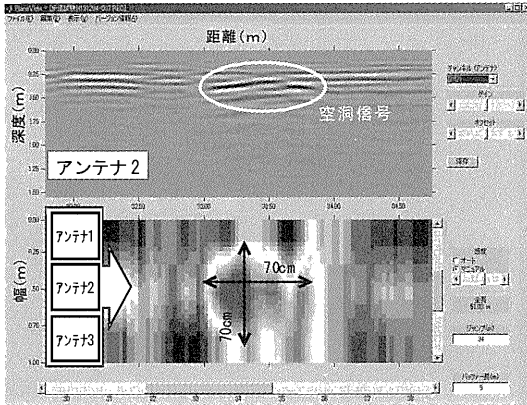


図-11 2次元処理結果

本探査車では、調査箇所 No.3 における2次元処理の結果、図-11 に示すように空洞は縦横ともに0.7mの広がりをもつ形状であると推測され、平面的な空洞寸法はハンディ型レーダおよび開削による調査結果と比較すると若干大きめではあるが近い値が確認された。ただし、深度については他の2箇所同様20cm程度の差があり、舗装の誘電率が要因とされる誤差と考えられ今後の検討課題ともされる。

以上の比較結果より、歩道下における空洞等の寸法、形状など概略的な把握は歩道下空洞探査車による調査で十分対応できるものと考えられる。

## 6. おわりに

歩道を対象とした歩道下空洞探査車を開発し、実機による実現場での試験を終了し、探査精度、

操作性などその有効性を確認した。今後は、国土交通省関東地方整備局管内において歩道の空洞調査を実施し、多様な現場条件への適用性を実証する。また、調査結果については、既存の路面下空洞データベースへの統合を図るため、データベースソフトの改良を加え、スタンドアロン型を基本としたデータベースの構築を行い、同探査車の普及に努めるものである。

最後に、本探査車の開発にあたりご協力頂いた財団法人道路保全技術センターならびに、関係各位の皆様に誌面をお借りして、感謝の意を表すものです。

J C M A

### 【筆者紹介】



持丸 修一（もちまる しゅういち）  
国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所  
機械課長



田中 義光（たなか よしみつ）  
国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所  
機械課専門職  
（現、企画部技術調査課建設専門官）



雨宮 圭吾（あめみや けいご）  
国土交通省関東地方整備局  
関東技術事務所  
機械課（現、荒川上流工事事務所機械課）