

# 車載式電磁波レーダを使用した 舗装内部のひび割れ検出事例と 特徴について

西日本高速道路エンジニアリング中国(株) 高砂 圭司  
ジオ・サーチ(株) 陰山 一

## 概要

アスファルト舗装のひび割れ深さ把握に対し

①車載式電磁波レーダを活用

②その検出事例の紹介

③特徴を紹介

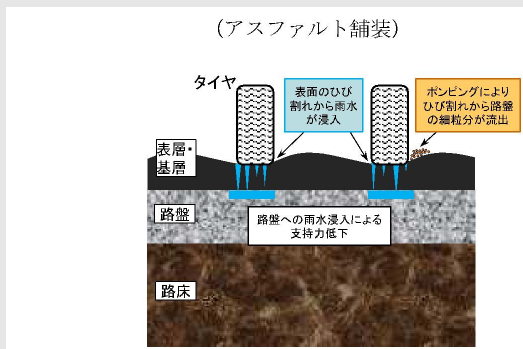
車載式電磁波レーダ (スケルカ)





# 背景 1

## 平成28年 国交省舗装点検要領 付録- 2 抜粋



### (1) アスファルト舗装

#### ひび割れ発生

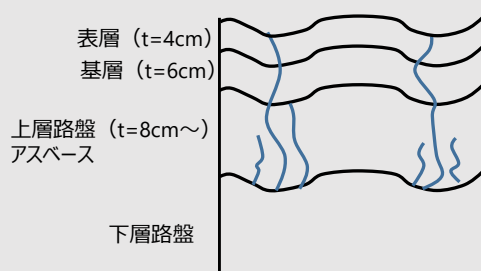
- 進行すると雨水が路盤以下の層へ・アスファルト混合物自体もはく離進行
  - 路盤以下の層が損傷（脆弱化） → 舗装体として支持力が低下
  - 表層等切削オーバーレイしても早期劣化
  - 路盤からの打換え措置が必要（費用増大）
- となるため、ひび割れを封かんして路盤以下の層を損傷させない観点が必要

5

# 背景 2

## 近年のNEXCO西日本の動向（高弾性上層路盤材の施工）

- 近年、路盤部の変状に起因した補修が増加傾向にある
  - 全国的な開削調査を実施した結果、上層路盤下面からのひび割れ（疲労ひび割れ）が多くで確認された
  - 舗装変状箇所においては、繰り返しの交通荷重等により上層路盤下面からのひび割れが表層まで貫通しているのも確認された
- ⇒ 上層路盤の高耐久化を目的とした大規模な補修が実施される予定

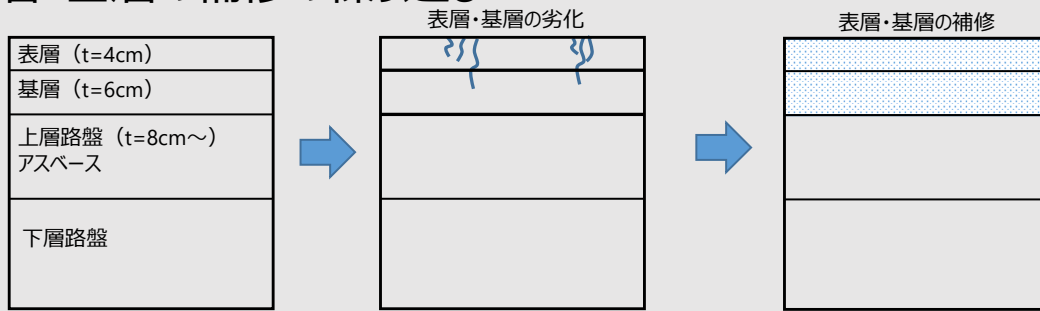


下層路盤に変状が発生している場合のイメージ

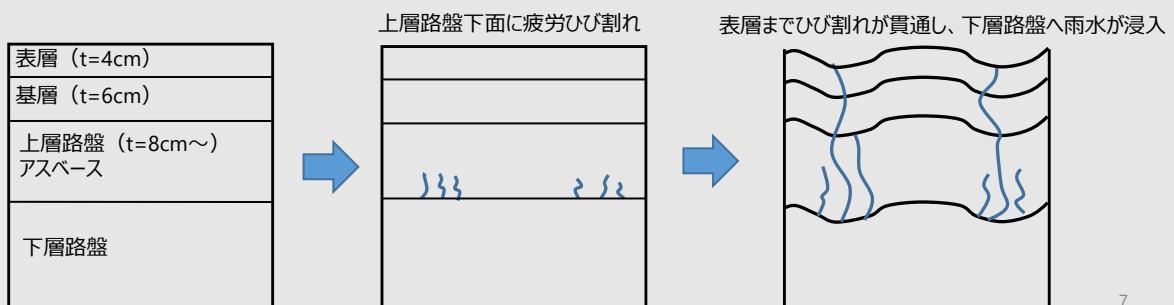
6

## 背景 2

これまでの補修は交通荷重で表層・基層が変状+雨水の浸入  
⇒表層・基層の補修の繰り返し



近年は上層路盤に疲労が蓄積し路盤下面に疲労ひび割れ発生  
⇒表層までひび割れが貫通し雨水浸入⇒下層路盤の永久変形



7

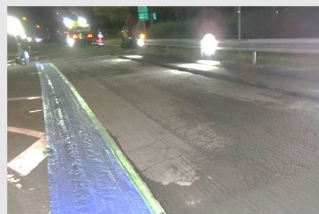
## 背景 3

補修工事前にアスファルト舗装の切削深さが事前に推測できないだろうか・・・？

舗装工事の事前調査でコア抜きを数か所実施するも路面切削時に切削後の路面のひび割れを確認し変更する事例もあり

その段階での変更によっておこる問題・・・

- 解放時間への影響
- 工事全体への影響
- 工事金額の変更



8

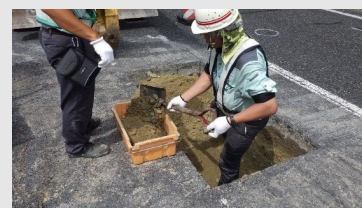
# 一般的な舗装の調査と問題点

9

## これまでのアスファルト舗装調査

- ・路面性状調査（ひび割れ、わだち、IRI）
- ・目視確認（舗装表面のクラック、わだち）
- ・FWD測定
- ・コアボーリング調査
- ・開削調査

### 開削調査



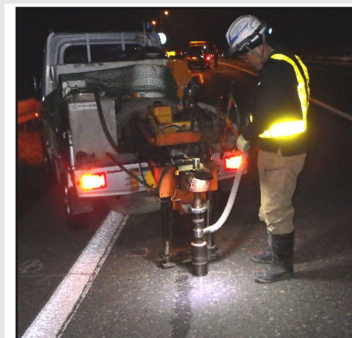
### 路面性状測定



### FWD測定



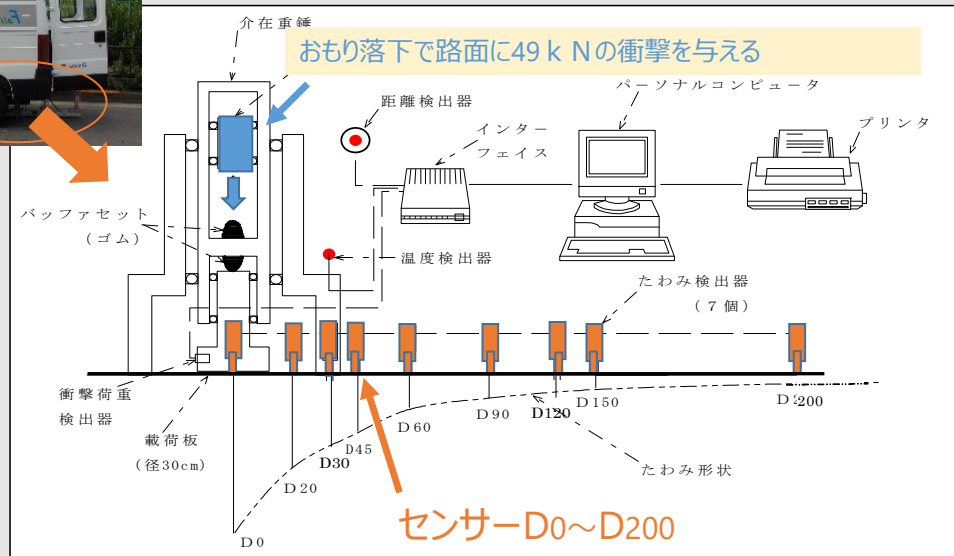
### コアボーリング



10

# FWD調査の限界

おもりを落とし、センサーがとらえたたわみ量から  
計算した値で補修深さを判断



11

## FWDの問題点

①調査に車線規制必要

⇒よって時間、測定数に限界がある。

②ポイント (部分的) 調査⇒面的な調査でない

③ランプ部⇒幅員狭い⇒車輪通過位置が測定出来ない場合も...



ランプ部でFWDを実施した状況

12

# 電磁波レーダの活用を検討

13

## As舗装の劣化調査に車載式電磁波レーダを検討

### 規制を必要としない車載式電磁波レーダを活用

※中国支社管内で、As舗装のひび割れ深さに対しての活用事例は、これまで無し（橋梁床版や空洞把握で有り）

電磁波レーダ測定車によるアスファルト舗装調査状況



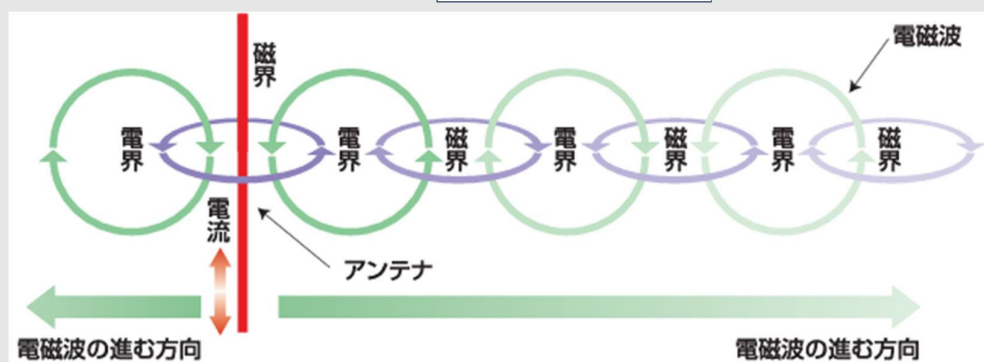
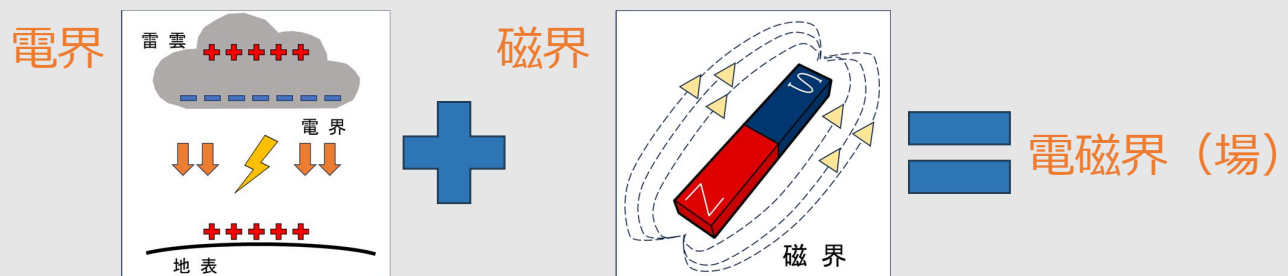
14

# 電磁波レーダの原理について

15

## 電磁波レーダとは 1

**電磁波**：電界と磁界が交互に発生しながら空間を伝わっていく波  
光と同じ速さ（秒速30万km）で進む。



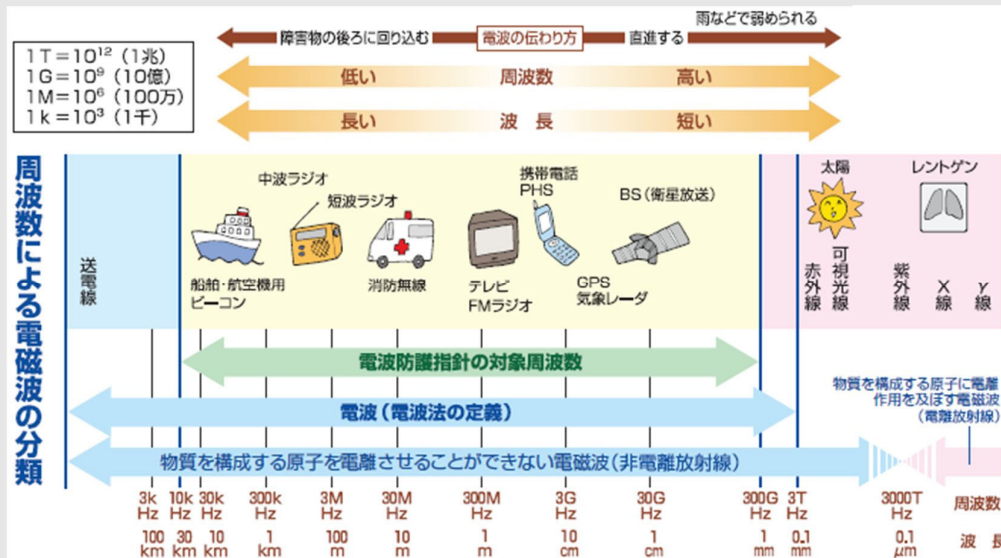
(総務省資料：電波と安心な暮らしより)

16



# 電磁波レーダとは 2

- 電波** : 電磁波のうち、周波数が3THz以下のもの（電波法）  
 →電波は、電磁波の一種。性質は、周波数によって異なる。
- レーダ** : Radio Detecting and Rangingの略。電波を使って目標の存在を感知し、その距離を測る装置



(総務省資料：電波と安心な暮らしより)

# 電磁波の特性

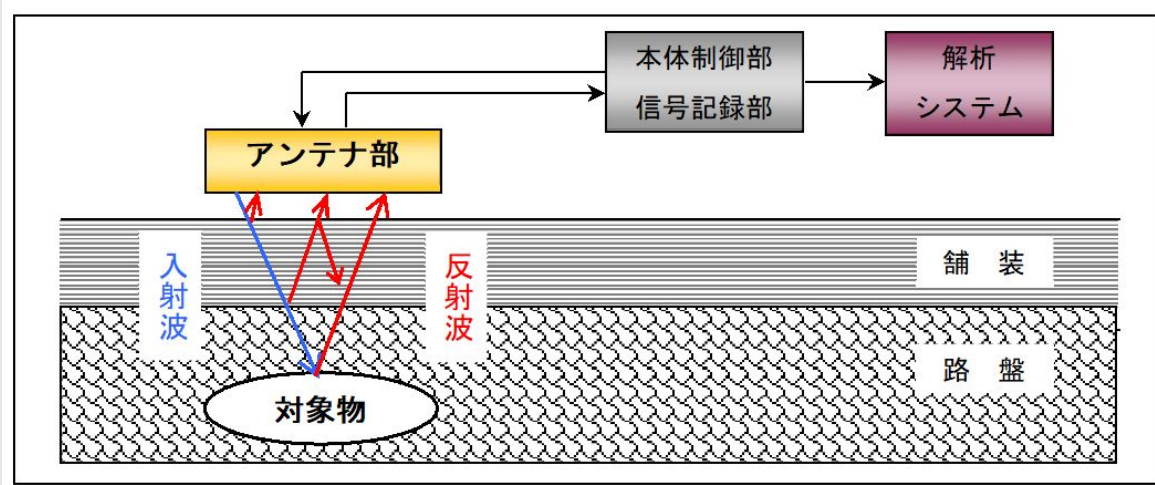
- ① 電気的特性（比誘電率 $\epsilon_r$ ）の異なる物質の境界面で反射波を生じる性質を持っている
- ② 比誘電率の違いにより、反射波の強度や極性が変わる特性もある
- ③ 空気は比誘電率が1であり、全物質中最小の値を持つ
- ④ 水分や反射面が多くなると、減衰が大きくなり、対象物の検知可能な深度が浅くなる傾向にある。

材 質	比誘電率	材 質	比誘電率	材 質	比誘電率
空 気	1	コンクリート (乾燥)	5~11	土 (乾燥)	2~ 6
発泡スチロール	1	コンクリート (湿潤)	8~20	土 (湿潤)	10~25
木 (乾燥)	1.5	砕 石	5~ 9	清 水	81
プラスチック	2~ 4	砂 (乾燥)	3~ 6	海 水	81
アスコン	4~ 6	砂 (湿潤)	10~25	雪 (かたまり)	1.4

\* 「理科年表」および試験結果より

# 電磁波レーダの測定システム

電磁波を用いた地中レーダ調査（Ground Penetrating Radar system）は、地中に送信した電磁波の反射波画像を解析することにより地中の異なる物質の位置や広がりを特定するものである。



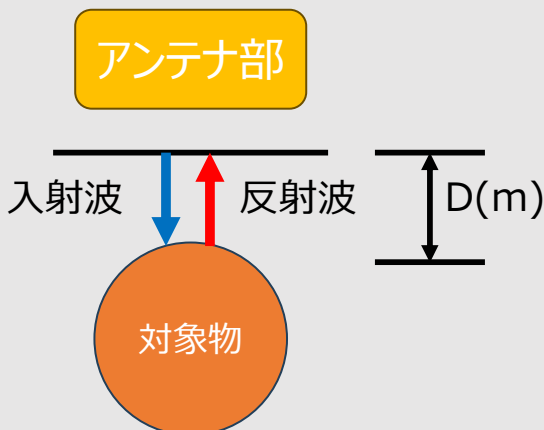
19

# 比誘電率と対象物の深度

**比誘電率**：物質の分極のしやすさ（電気を蓄えられる大きさ）の指標である誘電率のうち、真空の誘電率との比。

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

$\epsilon_r$  : 媒質の比誘電率  
 $\epsilon$  : 媒質の誘電率  
 $\epsilon_0$  : 真空の誘電率



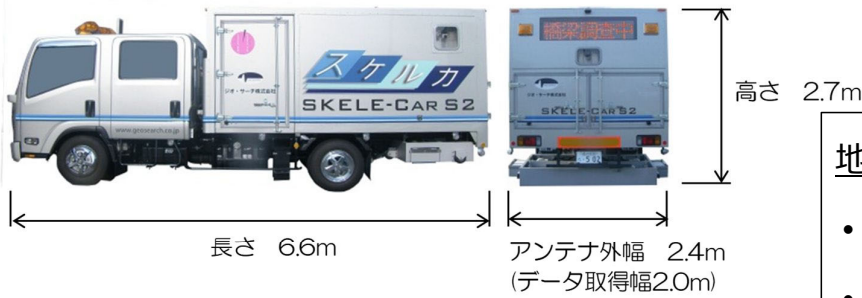
$$D = \frac{1}{2} \times T \times V$$
$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

D(m) : 対象物のかぶり深さ  
T(s) : 電磁波の往復時間  
V(m/s) : 電磁波の速度

20

# 車載型地中レーダ（自走式探査車）

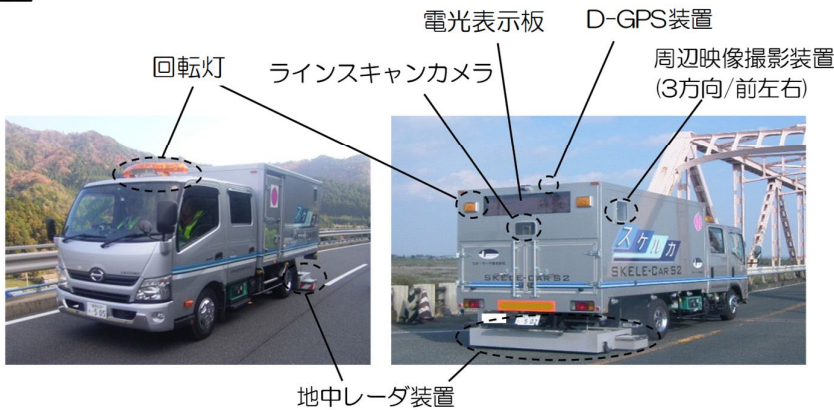
寸法



## 地中レーダ装置

- 最大調査速度:80km/h
- 探査深度:0.5m
- 探査幅:2.0m

装置



## 走行位置確認装置

- D-GPS装置
- 周辺映像撮影装置

## 路面映像撮影装置

- ラインスキャンカメラ

21

# 電磁波レーダの測定システムの適用

電磁波レーダ法

路面下空洞



地下埋設物



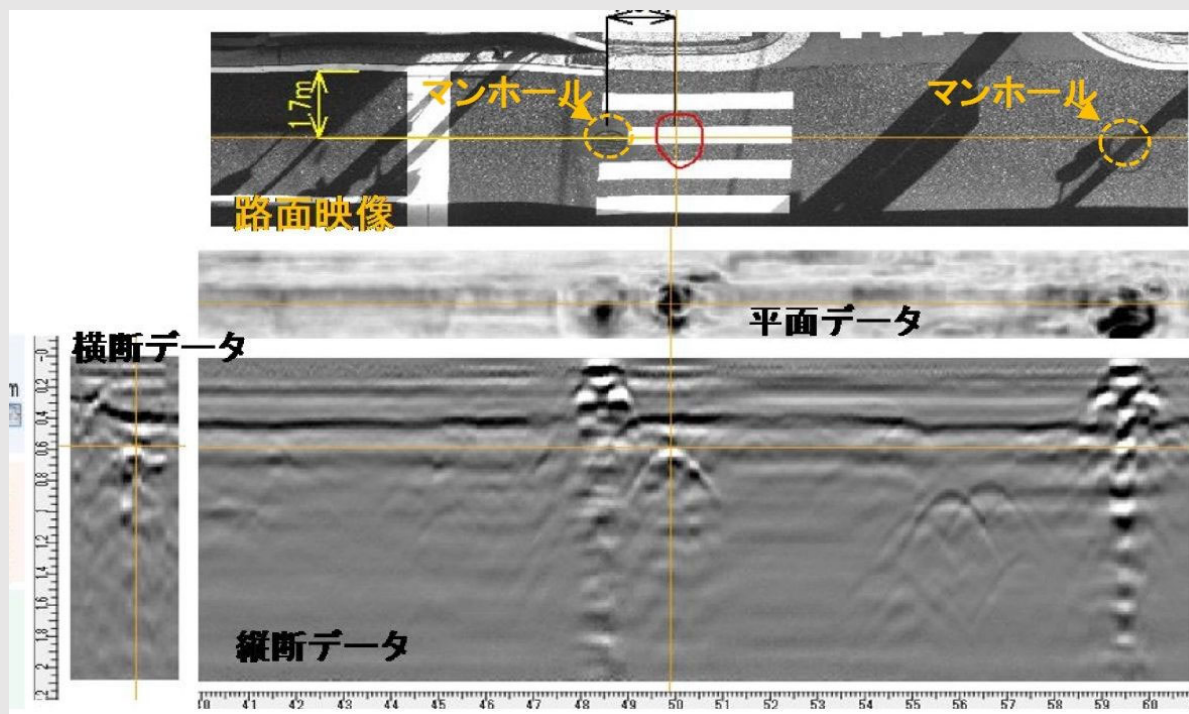
橋梁床版・  
舗装劣化



22

# 路面下空洞－陥没予防調査－1

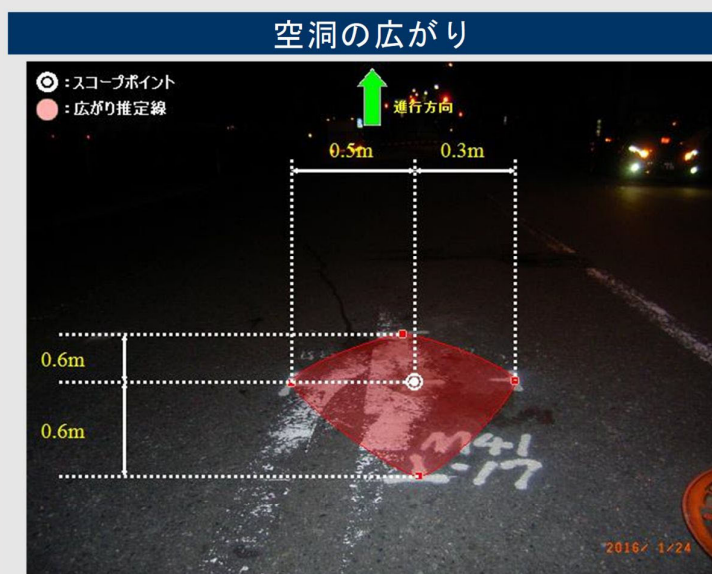
## 3次元データと路面画像



23

# 路面下空洞－陥没予防調査－2

## スコープ調査結果



## ドロースコップ撮影記録

ドロースコップ撮影記録		
異常箇所No. 録41-17		
撮影深度0.00~1.05(m)	構成/層厚(m)	深 度(m)
10	アスコン 0.31	
20		
30	コンクリート 0.06	0.31
40		0.37
50	空洞 0.67	
60		
70		
80		
90		
100	砂	1.04

## 空洞規模

深 度 (m)	0.37	空 洞 厚 (m)	0.67
縦断方向 (m)	1.2	横断方向 (m)	0.8
面 積 (m <sup>2</sup> )	0.96	体 積 (m <sup>3</sup> )	0.64

24

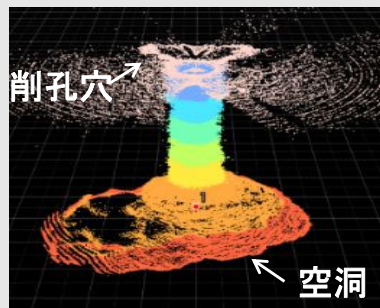
# 路面下空洞－陥没予防調査－3

## 360°カメラによる空洞内部撮影例



下水道取付管に破損を確認  
→土砂流出により空洞発生

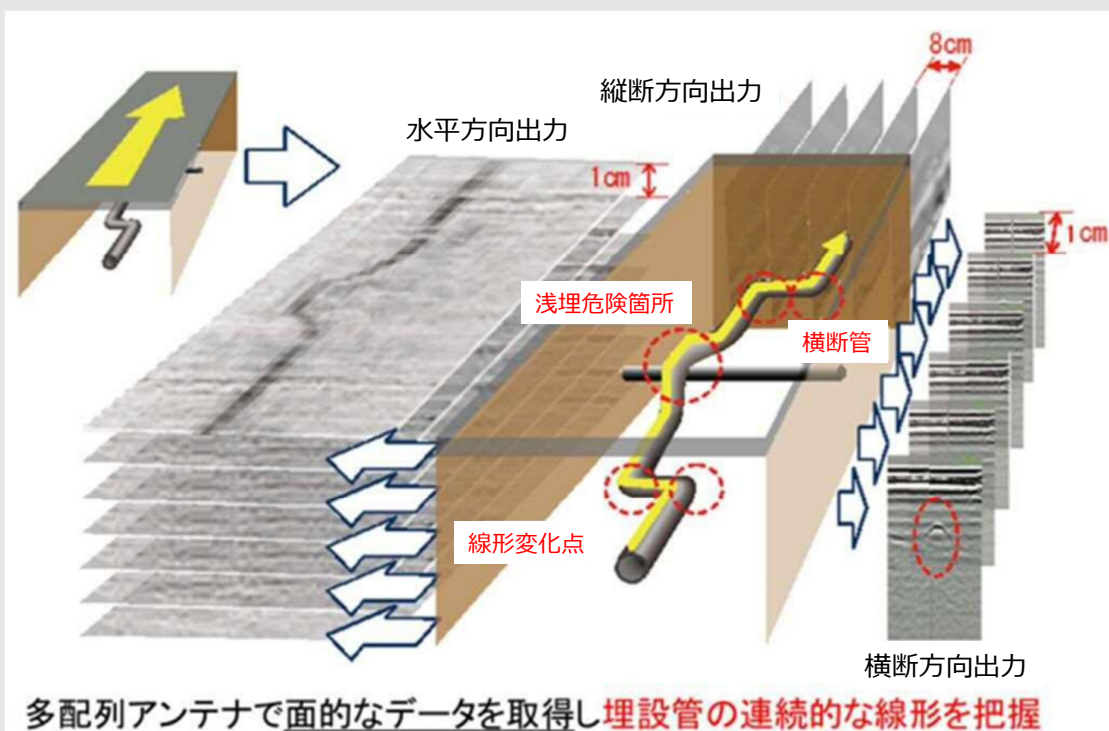
## 空洞内部点群装置による取得例



詳細な形状・規模を把握

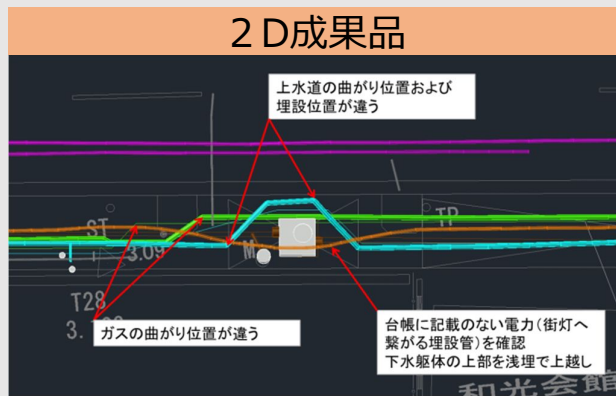
# 地下埋設物－地上・地下インフラ3Dマップ－1

## 取得データの三次元処理イメージ



# 地下埋設物－地上・地下インフラ3Dマップ－2

## 取得データの三次元処理イメージ

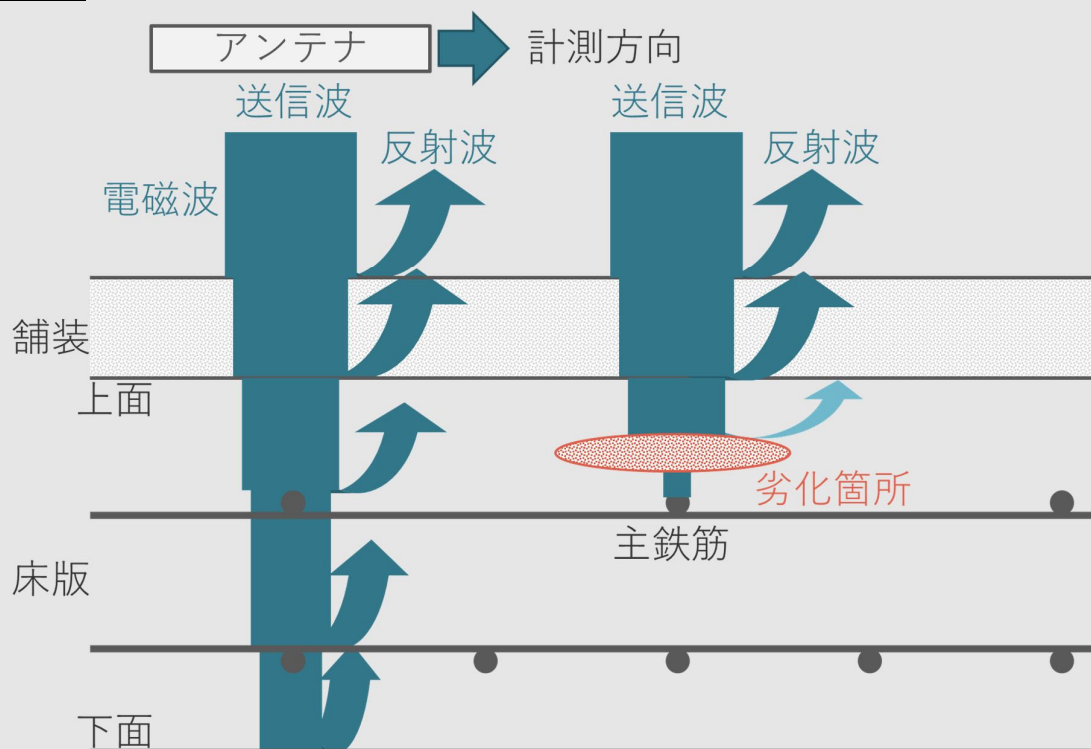


3D成果品



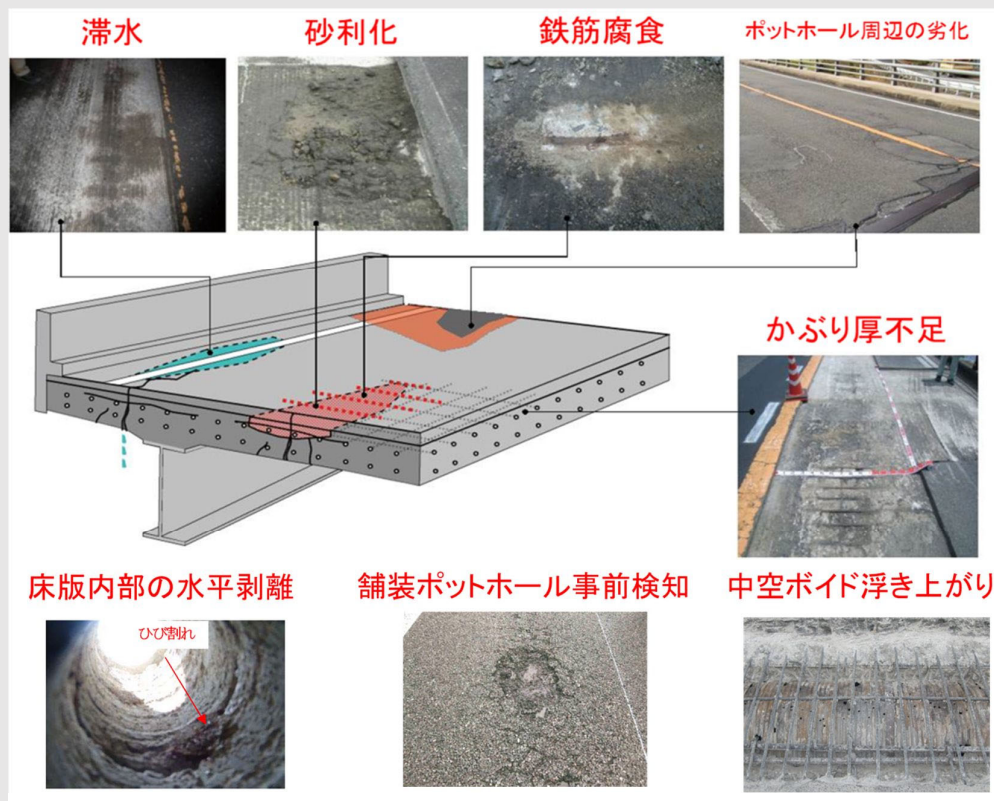
# 橋梁床版・舗装劣化－1

## 解析原理



# 橋梁床版・舗装劣化－2

## 解析内容

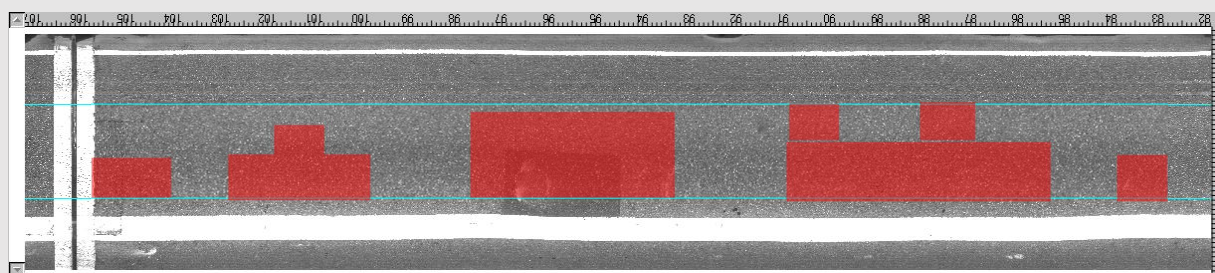


29

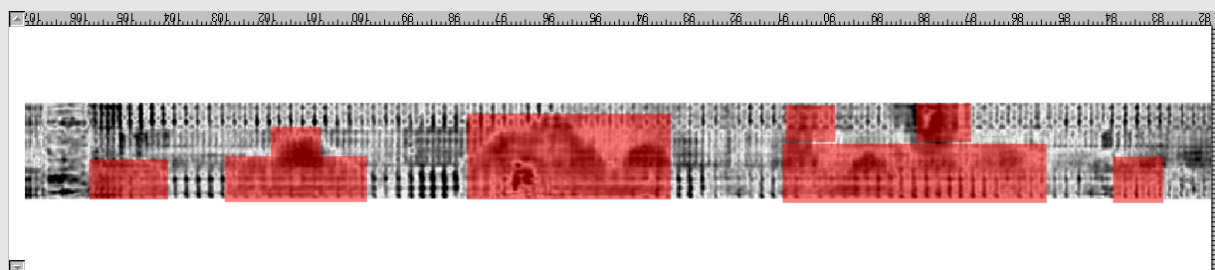
# 橋梁床版・舗装劣化－3

## 解析データ例

### 路面画像



### 平面スライスレーダ（路面から12cm）



30

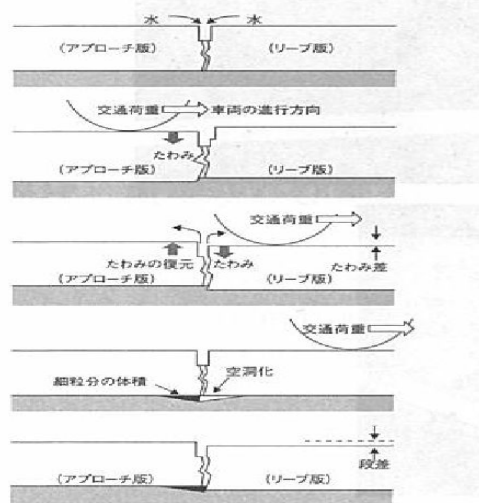
# コンクリート舗装調査での 電磁波レーダ調査事例

31

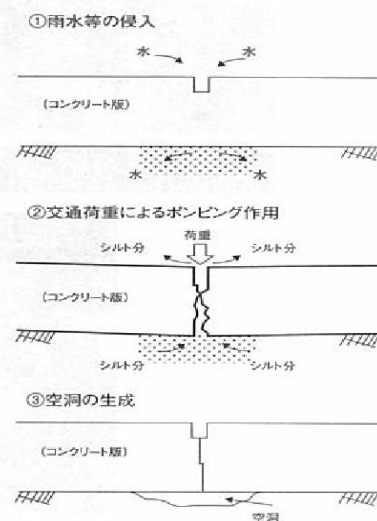
## コンクリート舗装調査での電磁波レーダ調査事例

### 【トンネルコンクリート舗装版下の空洞調査】

コンクリート舗装版では目地部に空洞が発生しやすい  
⇒空洞発生個所に段差が発生



付図-21.1  
段差発生プロセスの概念



付図-21.2  
エロージョン発生プロセスの概念

舗装点検要領に基づく舗装マネジメント指針より：日本道路協会

32



# コンクリート舗装調査での電磁波レーダ調査事例

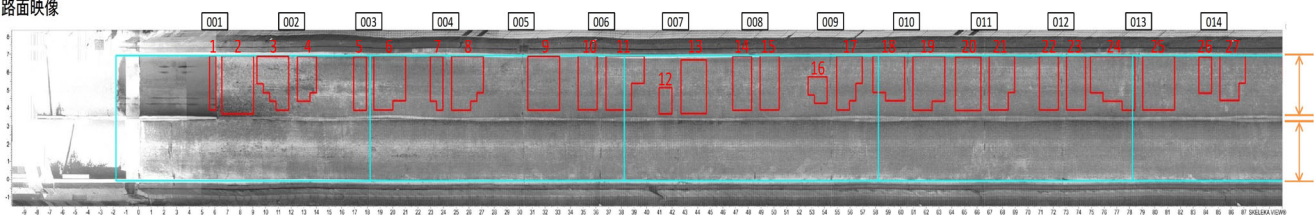
## TNコンクリート舗装版への電磁波レーダ調査の採用



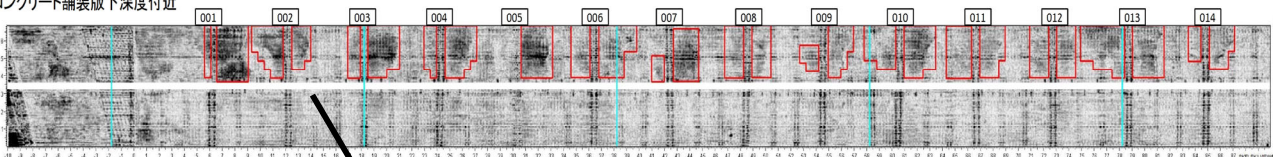
# コンクリート舗装調査での電磁波レーダ調査事例

## TNコンクリート舗装版への電磁波レーダ調査の採用

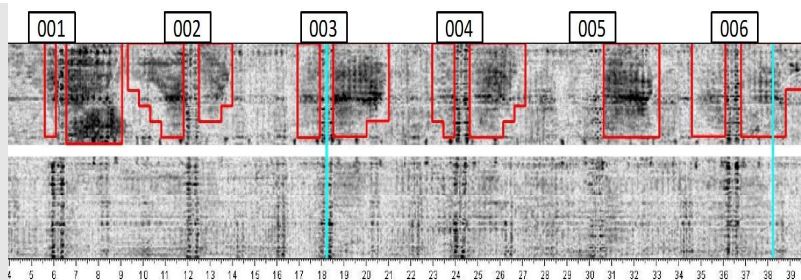
■路面映像



■コンクリート舗装版下深度付近



001~006拡大



# コンクリート舗装調査での電磁波レーダ調査事例

## ▶トンネル内のコンクリート舗装版のコア抜き調査実施

電磁波で空洞の疑い有り



電磁波で空洞の疑い無し



健全部は路盤材の細粒分が有るのに対し、空洞の疑いのある個所では細粒分が抜けている

2~3cmの空洞も確認

35

# アスファルト舗装のひび割れ把握に 電磁波レーの活用を検討

36



ひび割れ把握  
できないだろう  
か？

電磁波レーダの技術が向上してきている  
⇒ひび割れを微細な空洞として探知できない  
だろうか・・・？

37

## 電磁波レーダ検証の場所と状況

38

# 検証箇所 の 場所 と 状況

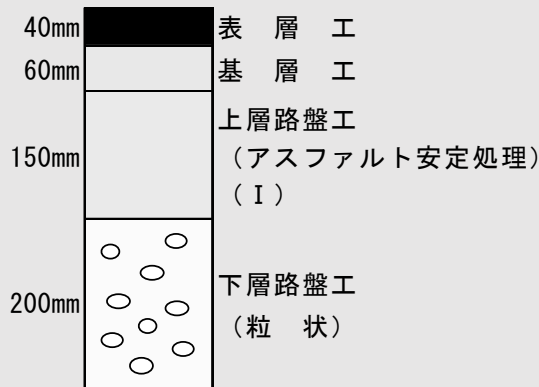
令和2年度に中国自動車道のパーキングエリアのランプ部で検証を行った。

選定理由：建設時からの舗装が全層未補修であった

昭和53年供用、全厚45cm、TA 27

表層：密粒40mm，基層用混合物60mm，

上層路盤：As安定処理路盤(タイプI) 150mm，下層路盤：粒状200mm



検証箇所

# 検証箇所 の 状況

全体的にわだち掘れと2方向及び格子状クラックが発生



検証箇所の状況

# 検証状況

- ・測定は、令和2年7月1日～2日に実施
- ・測定日の数日前から降雨があり、その後天候が回復して路面が乾いてきたタイミングでの測定となった。
- ・舗装内は、ひび割れに雨水が浸入し湿潤状態にあったと想像される。

## 検証箇所の降雨状況

月/日	降水量(mm)		気温(°C)	
	合計	最大1h	最高	最低
6/29	3.5	3.5	28.4	17.3
6/30	7.5	3.0	24.8	19.2
7/1	3.0	2.0	22.4	16.2
7/2	0.0	0.0	23.9	15.7

41

# 検証状況

## 測定状況



42

# 電磁波レーダ解析結果と コア抜きによる確認

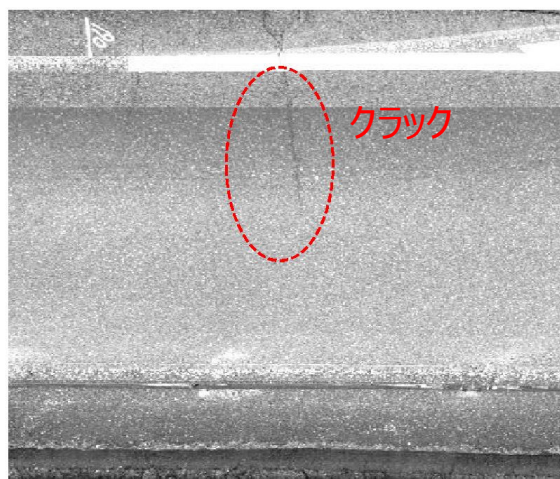
43

## 車載式電磁波レーダ解析結果内容

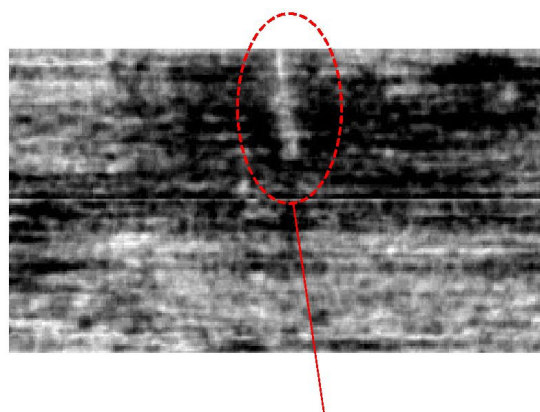
電磁波レーダ結果（平面図）⇒路面のひび割れと同じ位置で舗装内部にもひび割れの形状が確認できた

### 平面データ

#### 路面



### 上層路盤と下層路盤の境界付近



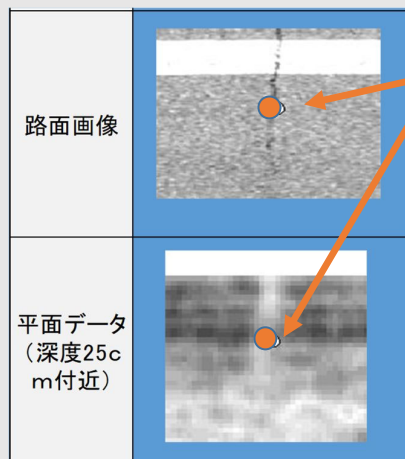
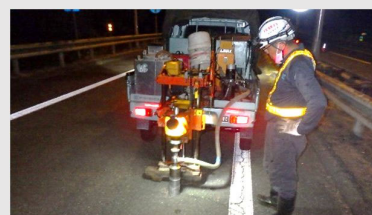
路面にあるクラックと同じ  
形状の反射が得られている

44

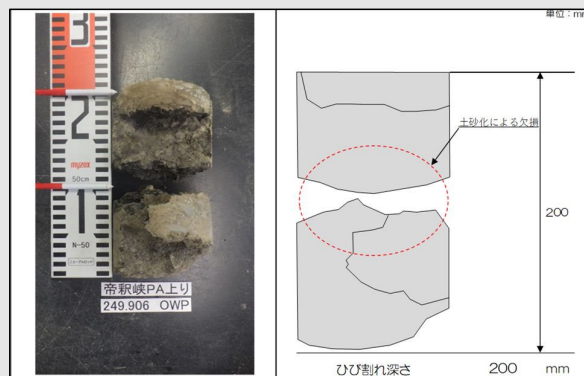
# コア採取による的中率の確認

事前に実施した電磁波レーダで

⇒ 6箇所の内部までひび割れ有り箇所 ⇒ コア調査実施



コア採取位置



# コア採取による的中率の確認

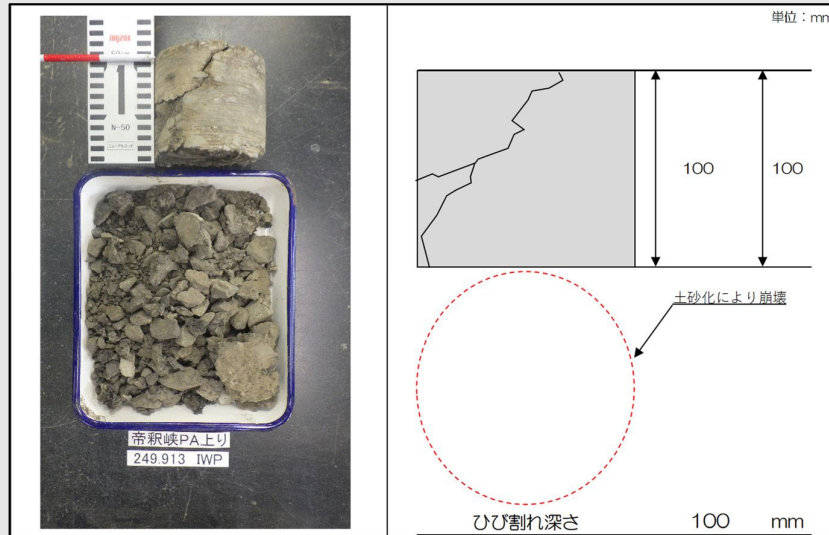
⇒ 結果：5箇所を確認 ⇒ 的中率83%

(今回は電磁波レーダ解析結果で空洞の疑いの反応が強く出ている箇所でコア抜き)

コア番号	電磁波レーダでの事前予測	採取したコアの状態	判定
コア1	全層に亀裂	全層に亀裂または剥離	○
コア2	表層部に亀裂	表, 基層部に亀裂, As安は砕石化	×
コア3	全層に亀裂	全層に亀裂	○
コア4	全層に亀裂	全層に亀裂または剥離	○
コア5	内部劣化反応	As安と基層の層間剥離	○
コア6	内部劣化反応	As安と基層の層間剥離	○

# コア採取による的中率の確認

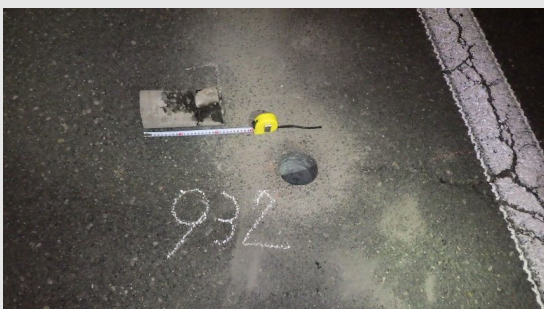
コア番号	電磁波レーダでの事前予測	採取したコアの状態	判定
コア2	表層部に亀裂	表, 基層部に亀裂 As安定処理路盤は碎石化	×



47

# 電磁波レーダの特徴

比誘電率の差からひび割れ内に雨水が浸入し湿潤状態の方が電磁波レーダでは検知しやすい特徴がある



48



# 電磁波の特性

- ① 電気的特性（比誘電率 $\epsilon_y$ ）の異なる物質（埋設物や空洞など）の境界で反射波を生じる性質を持っている
- ② 物質の持つ電気的特性の違いにより、反射波の強度や極性が変わる特性もある
- ③ 空洞は比誘電率が1であり、全物質中最小の値を持つ
- ④ 水は比誘電率が81で大きい値となる

材 質	比誘電率	材 質	比誘電率	材 質	比誘電率
空 気	1	コンクリート（乾燥）	5~11	土（乾燥）	2~ 6
発泡スチロール	1	コンクリート（湿潤）	8~20	土（湿潤）	10~25
木（乾燥）	1.5				
プラスチック	2~ 4	砕 石	5~ 9	清 水	81
		砂（乾燥）	3~ 6	海 水	81
アスコン	4~ 6	砂（湿潤）	10~25	雪（かたまり）	1.4

\* 「理科年表」および試験結果より

49

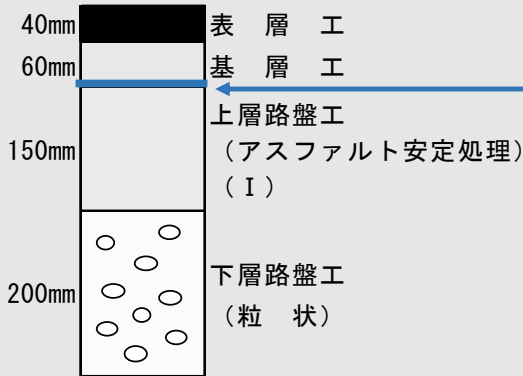
## 電磁波レーダ解析結果と 切削後の路面を確認

50

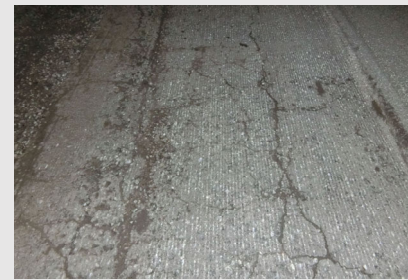
# 路面切削後のAs安上面のひび割れ目視との比較

表層+基層の10cm切削後のAs安定処理路盤表面を確認

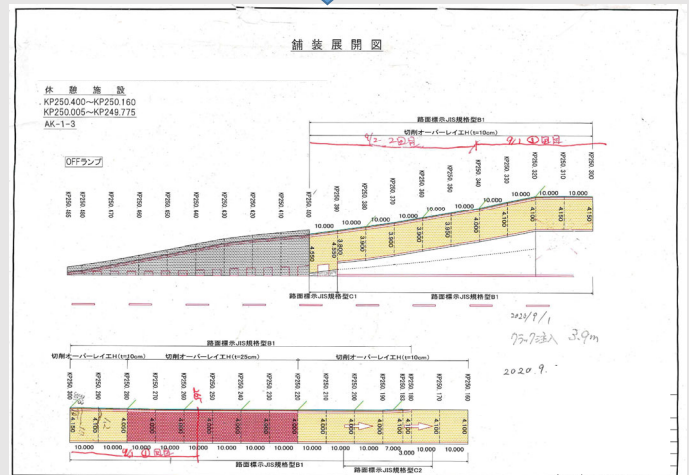
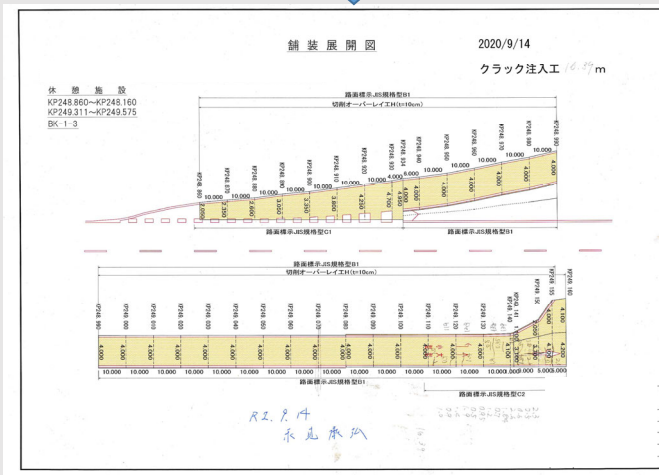
- ① 路面切削（表層+基層）後のAs安定処理路盤表面のひび割れ状況の資料を入手
- ② 電磁波レーダ解析画像で、①が確認できるか調べた



切削後のAs安定処理路盤表面のひび割れと電磁波レーダ解析データを比較



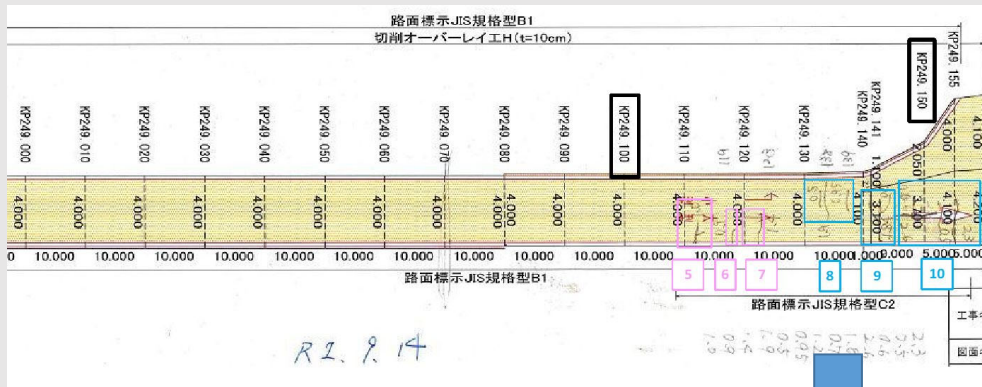
# 路面切削後のAs安上面のひび割れ展開図を入手



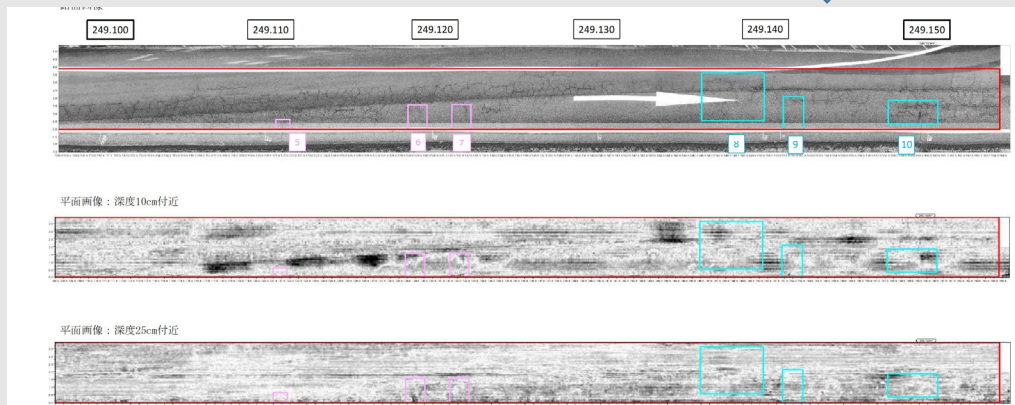
## ①路面切削⇒As安定処理路盤上面のひび割れ確認

電磁波レーダにて確認できたクラック

電磁波レーダにて確認できなかったクラック



## ②ひび割れが電磁波レーダ解析画像に映っているか確認



53

## 路面切削後のAs安上面のひび割れ目視との比較

- ① 電磁波レーダでひび割れの有無が検知できているものは、34箇所中14箇所であった。
- ② そのため路面より-10cmの切削後路面のひび割れでは、的中率は約41%であった。

54

# 路面切削後のAs安上面のひび割れ目視との比較

## 【的中率の低かった理由の考察】

- 舗装内のひび割れの多くは微細な間隙であり検知し難く解析結果にも反応が出ていないことが考えられる。
- 電磁波レーダの特性として、比誘電率の異なる境界で反射波を生じる性質がある。基層に使用されているアスファルト混合物と上層路盤に使用されているAs安では、比誘電率が同程度の層間では明瞭な反射波が得られ難いことも原因の1つと推測する



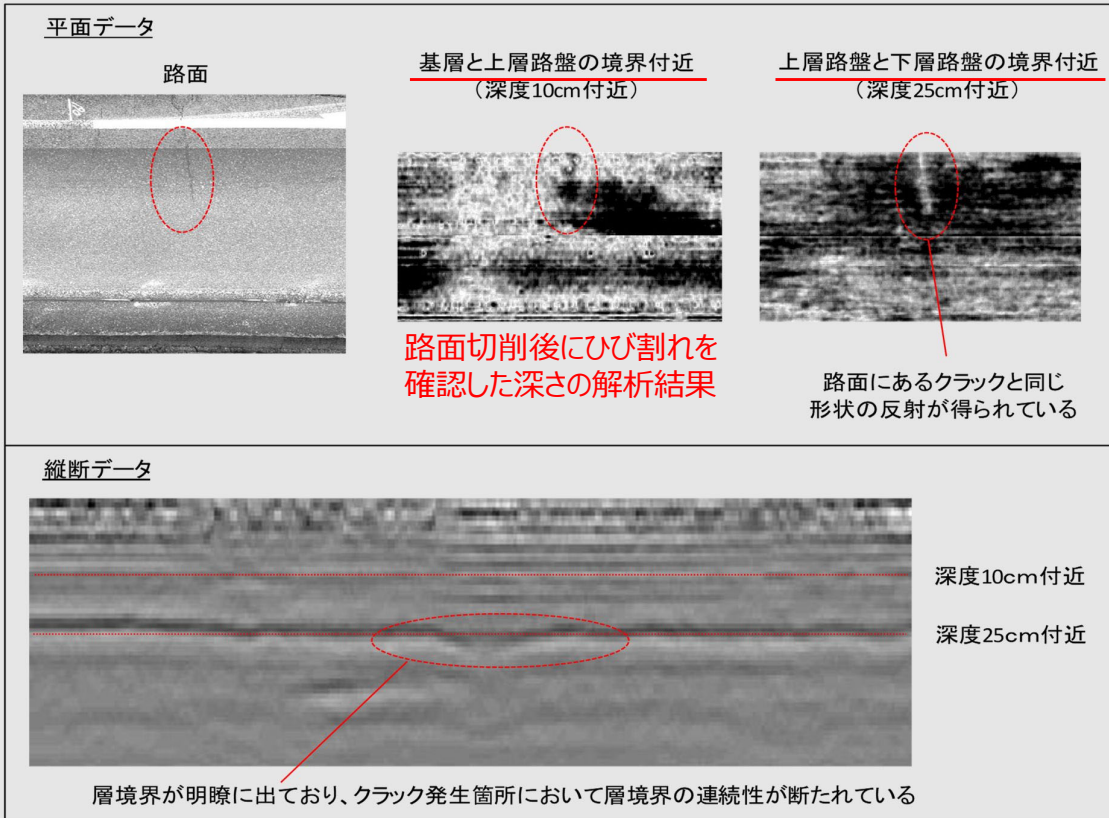
以後のスライドの解析結果の特徴で説明

材 質	比誘電率	材 質	比誘電率	材 質	比誘電率
空 気	1	コンクリート (乾燥)	5~11	土 (乾燥)	2~ 6
発泡スチロール	1	コンクリート (湿潤)	8~20	土 (湿潤)	10~25
木 (乾燥)	1.5	砕 石	5~ 9	清 水	81
プラスチック	2~ 4	砂 (乾燥)	3~ 6	海 水	81
アスコン	4~ 6	砂 (湿潤)	10~25	雪 (かたまり)	1.4

\* 「理科年表」 および試験結果より

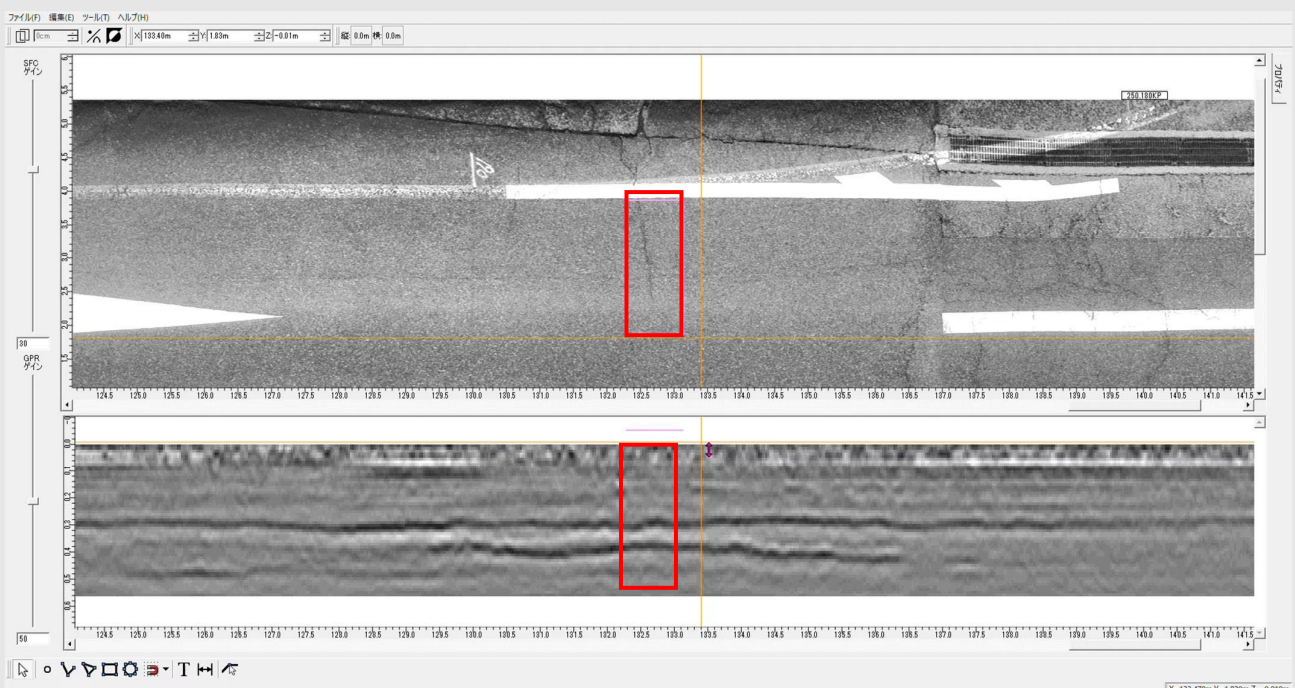
# 電磁波レーダ解析結果の特徴

# ひびわれ解析結果の特徴



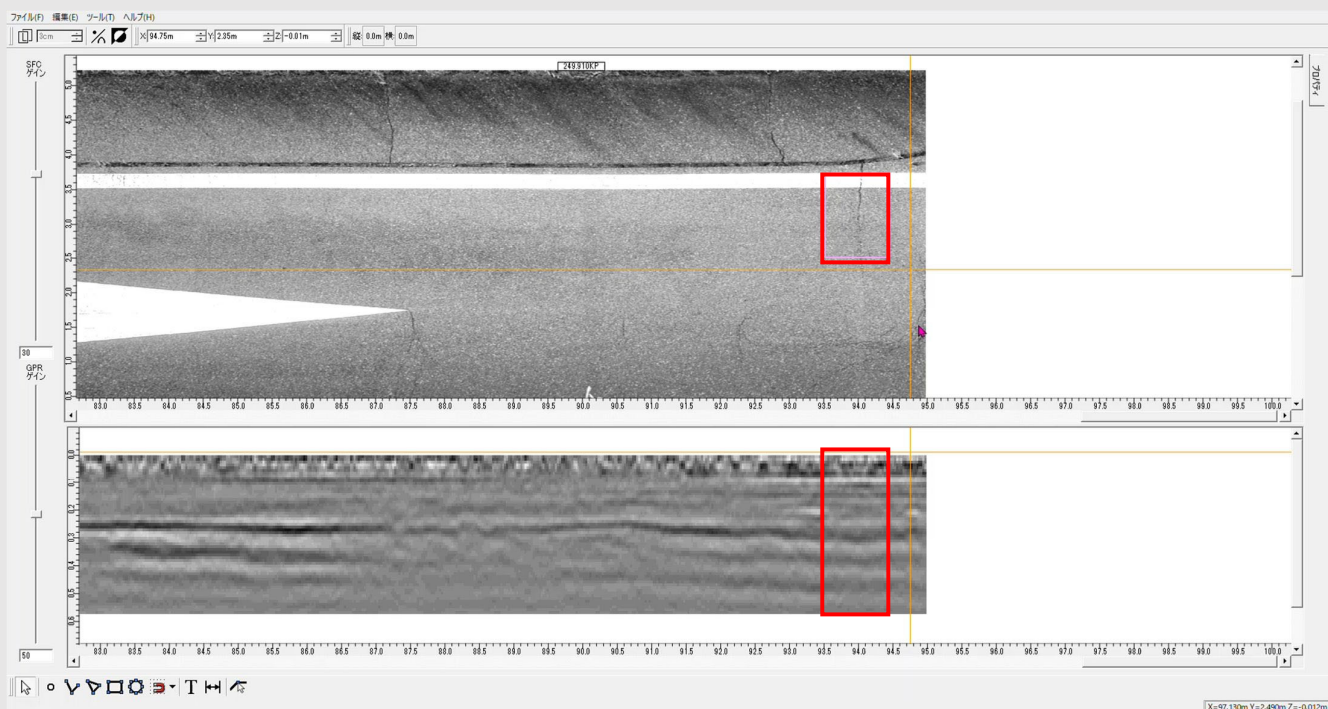
57

# 解析画像例1



58

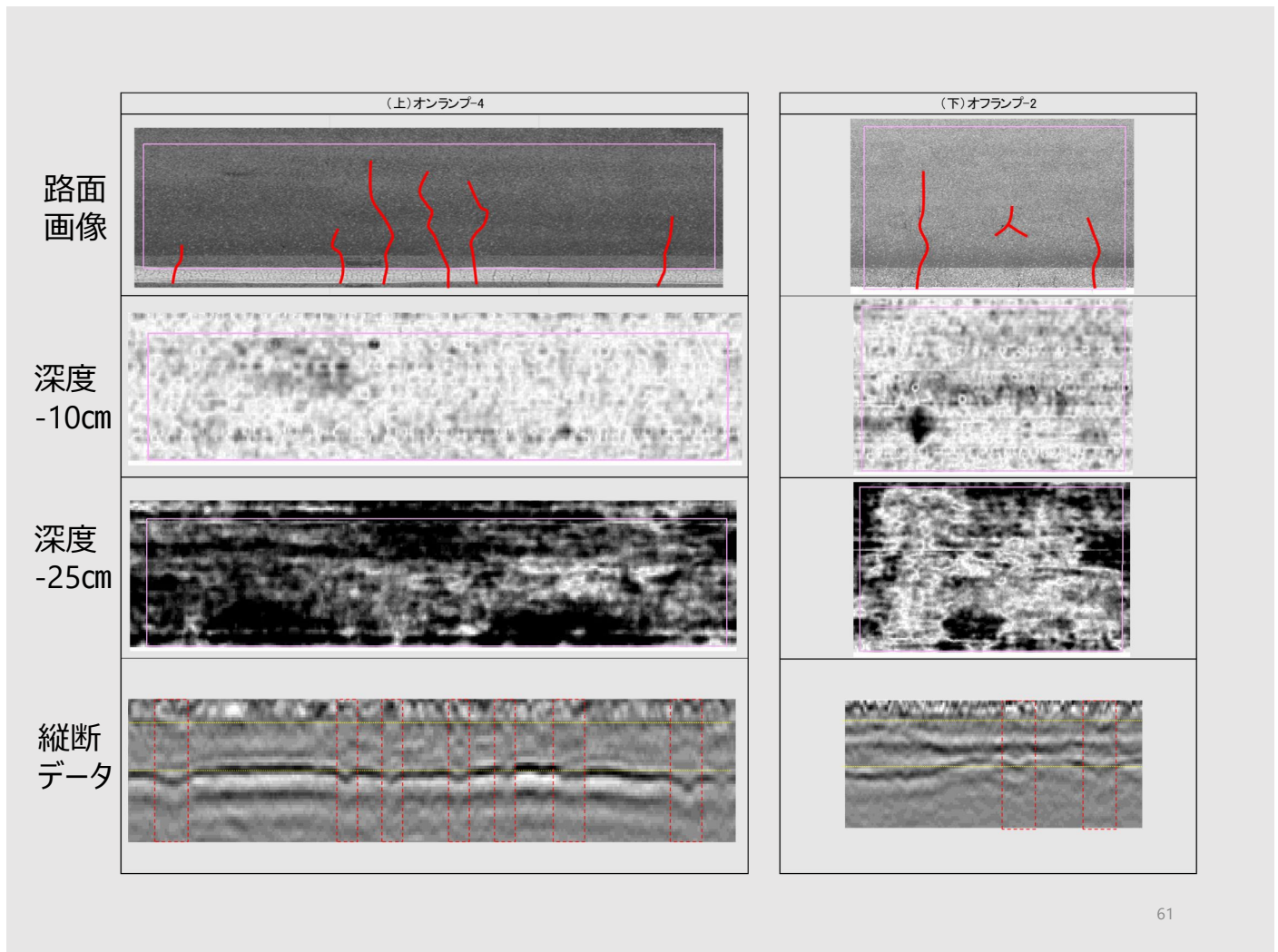
# 解析画像例2



## ひびわれ解析結果の特徴

	凡例	(上)オンランプ-15	(上)オンランプ-6	(下)オンランプ-1	(下)オフランプ-6
路面画像 (舗装表面)	 路面画像 ピンク枠がクラック箇所				
平面データ 深度10cm (基層とAs安の境界付近)	 深度10cm付近の 平面スライスデータ				
平面データ 深度25cm (As安と粒状路盤の境界付近)	 深度25cm付近の 平面スライスデータ				
縦断データ	 深度10cm 付近 深度25cm 付近 ひび割れ範囲				

※ ひび割れの疑いのある画像の特徴的な部分を示す



## なぜアスファルト安定処理路盤と粒状路盤の境界？

舗装表面にひび割れが確認できる箇所で、As安の下面までひび割れが到達している場合

経験的に・・・

比誘電率の差が大きい異なる材質の層間では、反射波の乱れが発生しやすくひび割れ発生を検出がしやすい傾向があるのでは？

材質	比誘電率	材質	比誘電率	材質	比誘電率
空気	1	コンクリート（乾燥）	5~11	土（乾燥）	2~6
発泡スチロール	1	コンクリート（湿潤）	8~20	土（湿潤）	10~25
木（乾燥）	1.5				
プラスチック	2~4	砕石	5~9	清水	81
		砂（乾燥）	3~6	海水	81
アスコン	4~6	砂（湿潤）	10~25	雪（かたまり）	1.4

\* 「理科年表」および試験結果より

# まとめ

63

## 今回の検証のまとめ

車載式電磁波レーダで反応が強く出ている部分は、高い確率（83%）で内部にひび割れが発生していることを確認した。

特徴として、基層とAs安定処理路盤の層境界付近よりもAs安定処理路盤と粒状路盤の層境界付近の比誘電率の差が大きい部分に反射波の乱れが発生しやすく反応がより強く出る傾向があった

64



## おわりに・・・

この手法は、まだ研究途上である。今後  
もAs舗装補修判断としてFWD調査やコア  
採取等を補完し、さらに舗装内部への水  
の浸入原因となる内部のひび割れ状況を  
把握し、路床・路盤の劣化へ進行する前  
に補修をおこなう予防保全型管理への提  
案やポットホールの事前予測に向け研究を  
行っていきたい。

ご清聴ありがとうございました