

# 土木研究所資料

## 地中レーダの空洞探査への適用性 とその評価に関する研究

平成10年3月

建設省土木研究所  
材料施工部施工研究室

Copyright©(1998) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



土木研究所資料  
第3547号 1998年1月

# 地中レーダの空洞探査への適用性 とその評価に関する研究

施工研究室 室長 塚田 幸広  
研究員 森 芳徳  
研究員 市村 靖光

## 要 旨

本資料は、樋門・樋管、下水道管渠等の土木構造物周辺に発生する空洞や緩みなどの地盤変状を電磁波による地中レーダを適用し、構造物の内面から外周地盤の変状を探査するために各種の実験および検討した結果をとりまとめたものである。

また、巻末には地中レーダによる空洞探査の適用範囲および技術資料として、主に調査・工事の計画、設計、施工管理を担当する関係者を対象とした「地中レーダによる空洞探査の手引き（案）」を示した。

キーワード：地中レーダ，地中空洞，RC構造物，非開削，非破壊探査

## は　じ　め　に

さきの兵庫県南部地震では、多くの土木構造物が被災し、河川構造物の樋門樋管や下水道管路などの地中構造物においても損傷が確認されている。これらの地中構造物の周辺には、周辺地盤との不同沈下などの原因によって空洞や水みちが発生している。これまでは、目視やテレビカメラなどで表面を観察し、コンクリートの亀裂や剥離の状況から周辺地盤の変状を間接的に推定する方法が用いられてきた。しかし、このような方法では構造物自体の健全性はある程度判断できるものの、周辺地盤の状態を含めた構造物全体の健全性を把握することは難しく、非破壊的な手段で空洞や緩み、あるいは水みちを精度よく探査する方法の確立が望まれていた。既往の研究では、電磁波による地中レーダの空洞探査への適用性が高いことが確認されているが、地中構造物は一般的に内部に鉄筋が配置されているため、二重鉄筋の場合には現状のレーダでは探査の可能性が極めて低かった。そこで、鉄筋の影響を最小限に押さえかつ背面の地盤の情報が得ることが可能なアンテナを用いて、模擬地盤において空洞探査実験を行い、その適用性を確認した。その結果、鉄筋間隔の狭く軸筋及びらせん筋を有するヒューム管、あるいは鉄筋間隔が150mmのボックスカルバートであっても、電磁波を効果的に透過させ背面の空洞を捉えることが確認できた。

本報告は、これまで土木研究所構内で行った室内実験、実大規模実験の結果を掲載するとともに、巻末にはこれらの実験結果や実現場調査の結果および考察を参考に、地中レーダ探査による空洞探査の適用範囲および技術的な資料として簡単に分かりやすく示し、また、調査・工事の計画、設計、施工管理を担当する関係者を対象とした「地中レーダによる空洞探査の手引き（案）」を掲載した。今後は、地中構造物の維持管理、補修更新に当たって、電磁波による地中レーダの技術が、本資料を参考として有効に活用されることを期待する。

施工研究室　室　長　塚田幸広  
研究員　森　芳徳  
研究員　市村靖光

## 目 次

|                          |    |
|--------------------------|----|
| I. 空洞探査実験                |    |
| 1. 調査概要                  | 1  |
| 1. 1 調査目的                | 1  |
| 1. 2 空洞探査技術の現状           | 1  |
| 1. 3 地中レーダの空洞探査への適用性     | 2  |
| 2. 下水道管周辺空洞探査実験          | 3  |
| 2. 1 ヒューム管               | 3  |
| 2. 2 実験地盤                | 4  |
| 2. 3 実験装置                | 4  |
| 2. 4 実験結果                | 8  |
| 2. 5 波形処理効果              | 20 |
| 2. 6 2チャンネル計測            | 27 |
| 2. 7 考察                  | 27 |
| 3. RCボックスカルバート周辺空洞探査実験   | 29 |
| 3. 1 RCボックスカルバート         | 29 |
| 3. 2 実験地盤                | 30 |
| 3. 3 実験装置                | 30 |
| 3. 4 実験条件                | 31 |
| 3. 5 実験結果                | 31 |
| 3. 6 考察                  | 34 |
| 4. まとめ                   | 34 |
| 5. 今後の課題                 | 35 |
| 参考文献                     | 36 |
| 実験状況写真                   | 37 |
| II. 地中レーダによる空洞探査の手引き (案) | 42 |

## I. 空洞探査実験

### 1. 調査概要

#### 1. 1 調査目的

本調査は、樋門・樋管、下水道管渠等の土木構造物周辺に発生する空洞や緩みなどの地盤変状を電磁波による地中レーダを適用し、現状の地中レーダの空洞探査への適用範囲を明らかにすることを目的とする。また、これらの実験および検討結果を参考に地中レーダによる空洞探査の適用範囲および技術資料を示した探査の手引き（案）を作成し、主に調査・工事の計画、設計、施工管理を担当する関係者の手引きとして活用が図れるように提案する。

#### 1. 2 空洞探査技術の現状

非破壊的に空洞を調査する方法としては、その目的、空洞およびその周辺の物性などにより様々な方法が考えられる。表－1に各手法の空洞探査の原理と適用性を示す。樋門・樋管や下水道管渠周辺の空洞探査では、基本的に水路を遮断して実施することから測定時間が短くリアルタイムに結果の得られるものが望ましい。また、構造的な制限や自然条件などから適用性の低いものもある。これらのことを総合的に判断すると、電磁波レーダが地下埋設物や路面下の空洞探査に実用化されており、地中構造物内から外周地盤の空洞探査への適用性が最も高いと考えられる。

表－1 各手法の空洞探査の原理と適用性

| 方 法            | 探 査 原 理                                                             | 適 用 性                                                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| ファイバースコープによる調査 | 底版に削孔して設けた検査孔からファイバースコープを挿入し、目視で空洞を観察する。                            | 検査孔周辺の情報しか得ることができない。                                      |
| 電磁波レーダによる探査    | 地中に放射された電磁波が誘電率の異なる境界で反射することを利用して空洞を探査する。                           | 最も適用性が高いと思われるが、周波数範囲などの検討が必要である。                          |
| 弾性波探査          | 構造物の表面加振に対する応答をインピーダンスとして測定し、構造的強さを推定する。                            | 打撃により探査に必要な周波数成分を発生させることが難しい。                             |
| 表面温度差法         | 空洞の熱伝達率が周辺地盤と異なることから、構造物の表面温度の分布を測定して構造物下の状況を推定する。                  | 部材が厚い場合には、定量的で精度の高い結果を得ることは難しい。また、構造物の表面が湿潤状態のときには適用性が低い。 |
| 音 響 分 析        | 構造物を打撃した場合、構造物下に空洞がある場合とない場合では音響放射が異なることから、発生した音の周波数を分析し空洞の有無を判定する。 | 部材が厚いコンクリート構造物には適用性が低い。                                   |

### 1. 3 地中レーダの空洞探査への適用性

土木研究所ではこれまで河川構造物である樋管の外周地盤に発生する空洞・水みちに対する電磁波レーダ探査の検討を行ってきており<sup>12)</sup>、その基礎的な実験の結果から表-2に示すような見解を得ている。実際の現場で使用されている樋管のスペックはそのほとんどが200mm以下のダブル配筋であるため、これまで用いられてきた既存のレーダ装置では、鉄筋による共振及びコンクリート床版内の伝搬による減衰を考慮した対策が必要であった。これらの結果を踏まえその後、(財)国土開発技術研究センターにおいて河川構造物の非破壊探査システムの検討<sup>3)</sup>が行われ、レーダアンテナを改良することによって鉄筋間隔が12.5cmの鉄筋コンクリート構造物においても空洞探査が可能であることが確認されている。

表-2 地中レーダの空洞探査への適用性

| 中心周波数<br>構造物 | 鉄筋コンクリート床版(厚さ300mm程度) |         |       |
|--------------|-----------------------|---------|-------|
|              | 鉄筋間隔:シングル配筋           |         | ダブル配筋 |
|              | 200mm以上               | 200mm以下 | 200mm |
| 1GHz         | ◎                     | ○       | ×     |
| 900MHz       | ○                     | ×       | ×     |
| 500MHz       | ○                     | ×       | ×     |

\* ◎:推定可能,○:1部推定可能,×:推定不可能

以上の検討結果を踏まえ、現状の地中レーダ探査装置の適用範囲を明確にするために、実現場に近い条件の下で、ボックスカルバート、ヒューム管の2種類のRC構造物を対象に、構造物の直下に模擬空洞を設置し、構造物内面をレーダアンテナを走査し、空洞探査実験を行った。各構造物に対する実験目的および条件を以下に示す。

#### (1) ヒューム管周辺空洞探査実験

- ①らせん筋間隔6.5cm以上のヒューム管への適用性の確認
- ②上記スペックにおいてヒューム内に水位を伴う場合の適用性の確認
- ③らせん筋間隔3.5cmのヒューム管への適用性の確認
- ④上記スペックにおいてヒューム管内に水位を伴う場合の適用性の確認

#### (2) ボックスカルバート周辺空洞探査実験

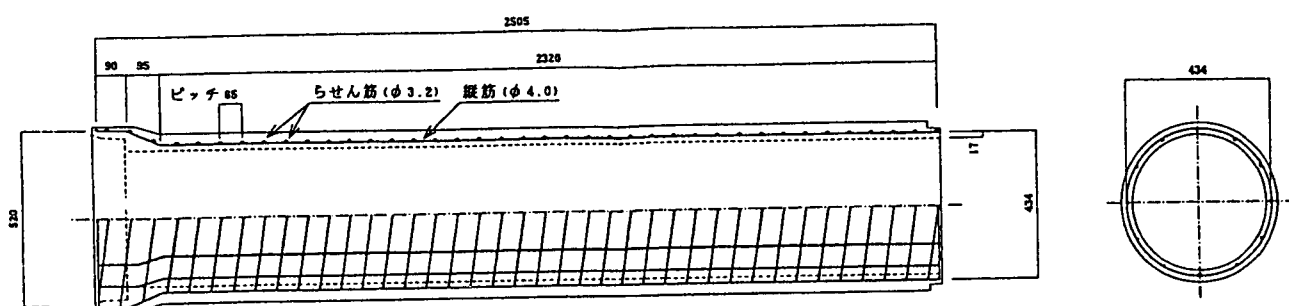
- ①鉄筋間隔15×15cmダブル配筋以上の床版への適用性の確認
- ②上記スペックにおいて床版直下に水位を伴う場合の適用性の確認
- ③鉄筋間隔10×10cmダブル配筋の床版への適用性の確認  
(現状では最も多密配筋と考えられる)
- ④上記スペックにおいて床版直下に水位を伴う場合の適用性の確認

## 2. 下水道管周辺空洞探査実験実験

### 2. 1 ヒューム管

本実験に使用したヒューム管は $\phi 400$  mmのB 1 種およびB 2 種の2タイプを使用した。違いはらせん筋のピッチおよび径であり、外形寸法は同じである。図-2. 1に両管の配筋図を示す。

B 1 種  $\phi 400$  配筋図



B 2 種  $\phi 400$  配筋図

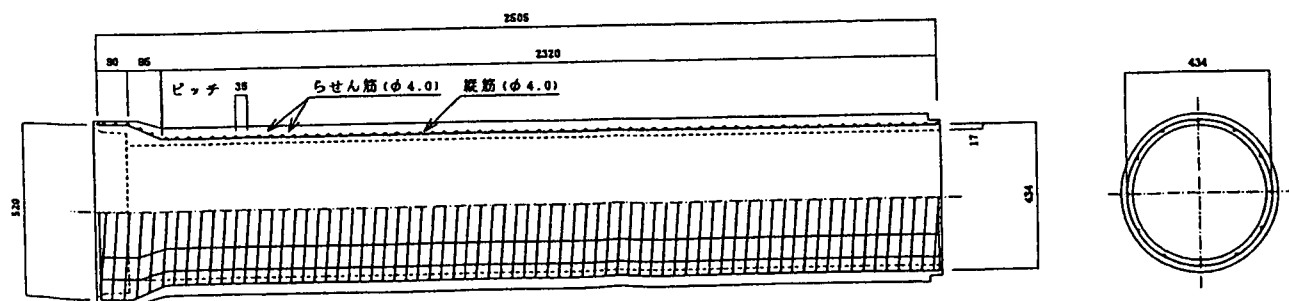
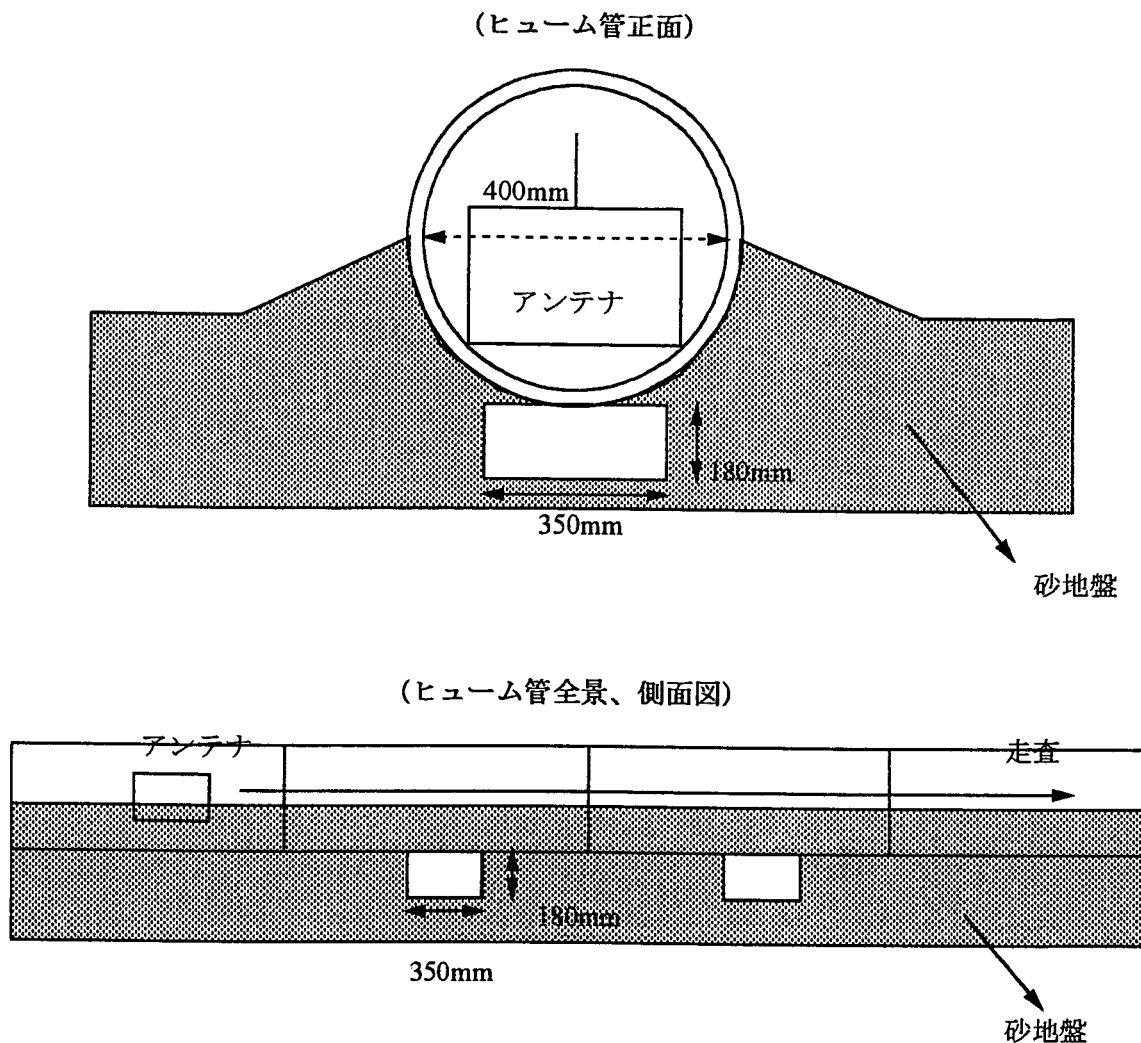


図-2. 1 ヒューム管配筋図

## 2. 2 実験地盤

図-2. 2に実験地盤を示す。計測方法は管内に装置（アンテナ）を挿入し、ロープで引張る形式をとった。ヒューム管は4体が連結され、2体目および3体目のほぼ中心に空洞が設定された。下図にその概要を示す。



## 2. 3 実験装置

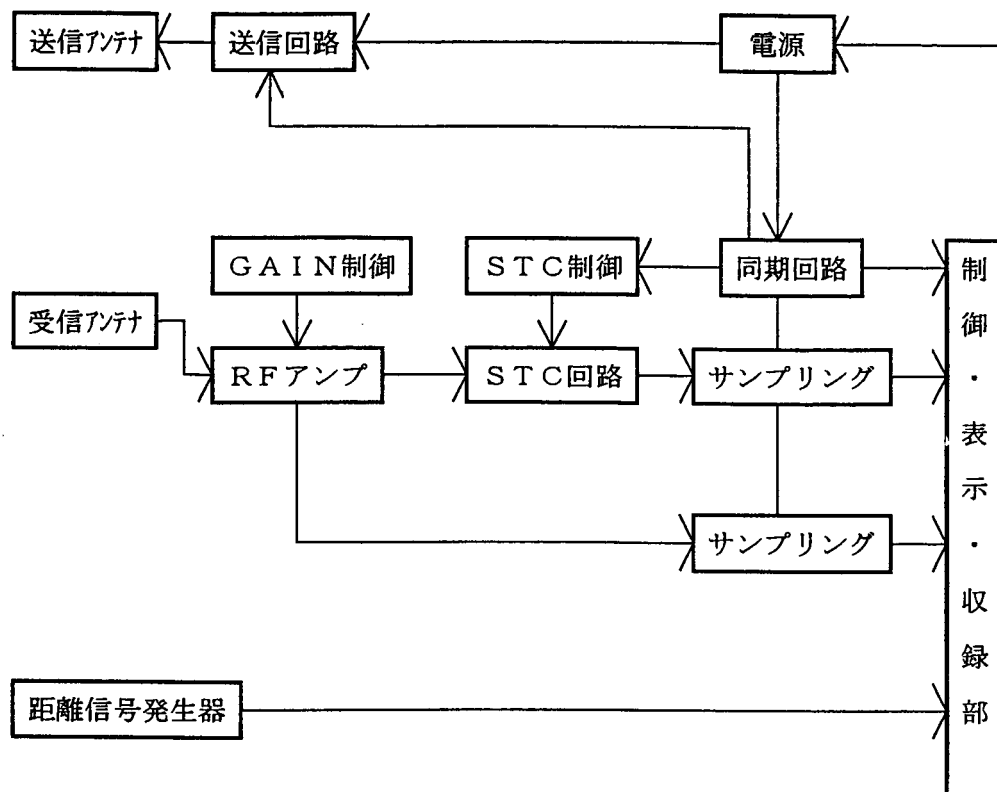
### (1) アンテナ

アンテナは2つのタイプを用意した。両タイプとも同一の汎用型から改良されたアンテナであり、汎用タイプとは若干異なる。一方は、汎用タイプの持つ分解能力を維持し、より高深度能力を高めることを目的に作られたアンテナである。以降、このタイプを型式で呼び、KSD8-20とする。もう一方は、前者と同一の汎用タイプの持つ分解能力を維持し、より高深度を高めるとともに、地中に放射される電波のビーム角度を狭くしたもの

である。これは主に鉄筋対策である。また、防水能力を備え、樋管等の水路内計測を想定して作られたタイプであり、前述した樋管調査における調査事例は、本アンテナにより達成されたものである。以降、このタイプを型式と呼び、KSD9-20とする。以下の表-2.1に両タイプのベースモデルとなった汎用タイプの一般的仕様、図-2.2にシステムブロック図を示す。

表-2.1 一般的装置仕様

| アンテナ概要        |             |
|---------------|-------------|
| アンテナ要素形状      | 三角形ダイポール    |
| 材質            | アルミニウム製鋳物   |
| シールド          | フェライト電波吸収体  |
| 重量            | 15kg        |
| 電氣的性能         | 主に主性能       |
| 送信出力          | 40Vp-p      |
| 繰り返し周波数       | 50KHz       |
| パルス幅          | 1.0nsec     |
| 高周波受信利得（1回路）  | 20db        |
| 増幅回路利得（2回路）   | 20db        |
| 低周波信号周期（同期信号） | 24Hz        |
| STC機能（1回路）    | 有り          |
| 消費電力          | 2Amax(+15V) |
| 入出力信号条件       | サンプリング性能    |
| サンプリング回路      | 2回路         |
| アナログ信号出力①     | STC回路通過出力   |
| アナログ信号出力②     | STC回路無通過出力  |
| 同期信号出力        | 24Hz        |
| 距離信号出力        | 2cm/1パルス    |
| アナログ信号入力      | 24Hz        |
| 同期信号入力        | 24Hz        |
| 距離信号入力        | 2cm/1パルス    |



図－ 2. 2 入出力経路ブロック図

次にKSD8-20およびKSD9-20の主な特徴(汎用型からの変更から得た性能)を示す。

(KSD8-20)

- ・ 周波数可変 ( $\infty \sim 1500\text{MHz}$ )
  - ・ 出力可変 ( $20\text{Vpp} \sim 200\text{Vpp}$ )
- (ただし、周波数および出力の独立変更は不可)

(KSD9-20)

- ・ 周波数可変 ( $\infty \sim 1500\text{MHz}$ )
  - ・ 出力可変 ( $20\text{Vpp} \sim 200\text{Vpp}$ )
- (ただし、周波数および出力の独立変更は不可)
- ・ 受信感度可変 ( $20\text{dB} \sim 26\text{dB}$ 、通常  $20\text{dB}$ )
  - ・ STC特性変更 (受信感度  $26\text{dB}$  時用)
  - ・ フェライトシールド強化 (水路内乱反射、受信感度増対策)
  - ・ 出力ビームの狭角化 (配筋対策)
- (ただしアンテナが水中にある場合において効果大)
- ・ 防水型 (Max 2気圧防水)

- ・磁気センサー式距離計（水中可動化）

## （２）制御収録装置

今回用いた制御収録装置には以下の特徴がある。

- ・高速振幅補正機能（対数式振幅増幅）
- ・高速スタック機能（加算平均、収録波形のS／N比向上）
- ・高速差分処理機能（局所変化の抽出）
- ・収録時間長・表示断面長の任意可変（極浅所帯の高密度収録、拡大表示）

特に局所変化物（空洞や埋設物等）の抽出に有効な、振幅回復や差分処理がほぼ現地計測時でのリアルタイムで行えるようになった。

実験装置は上述したとおりであるが、アンテナ下盤に挿入したダンパー材の違いや周波数変更を実施しているため、変更内容を以下に示す。

### （ダンパー）

1. モルタル盤
2. なし（空隙状態）
3. 水袋

### （周波数）

1. 1000MHz
2. 500MHz

## 2. 4 実験結果

実験結果の一覧表を表-2. 2にとりまとめた。また、これらに対応する結果図を図-2. 3~図-2. 13に示した。結果の判定基準は以下のとおりである。

A ; 空洞反応を明確に認識できた (差分処理実施)

(差分処理は計測時のリアルタイム処理である。)

B ; 弱い空洞反応が認識できる。

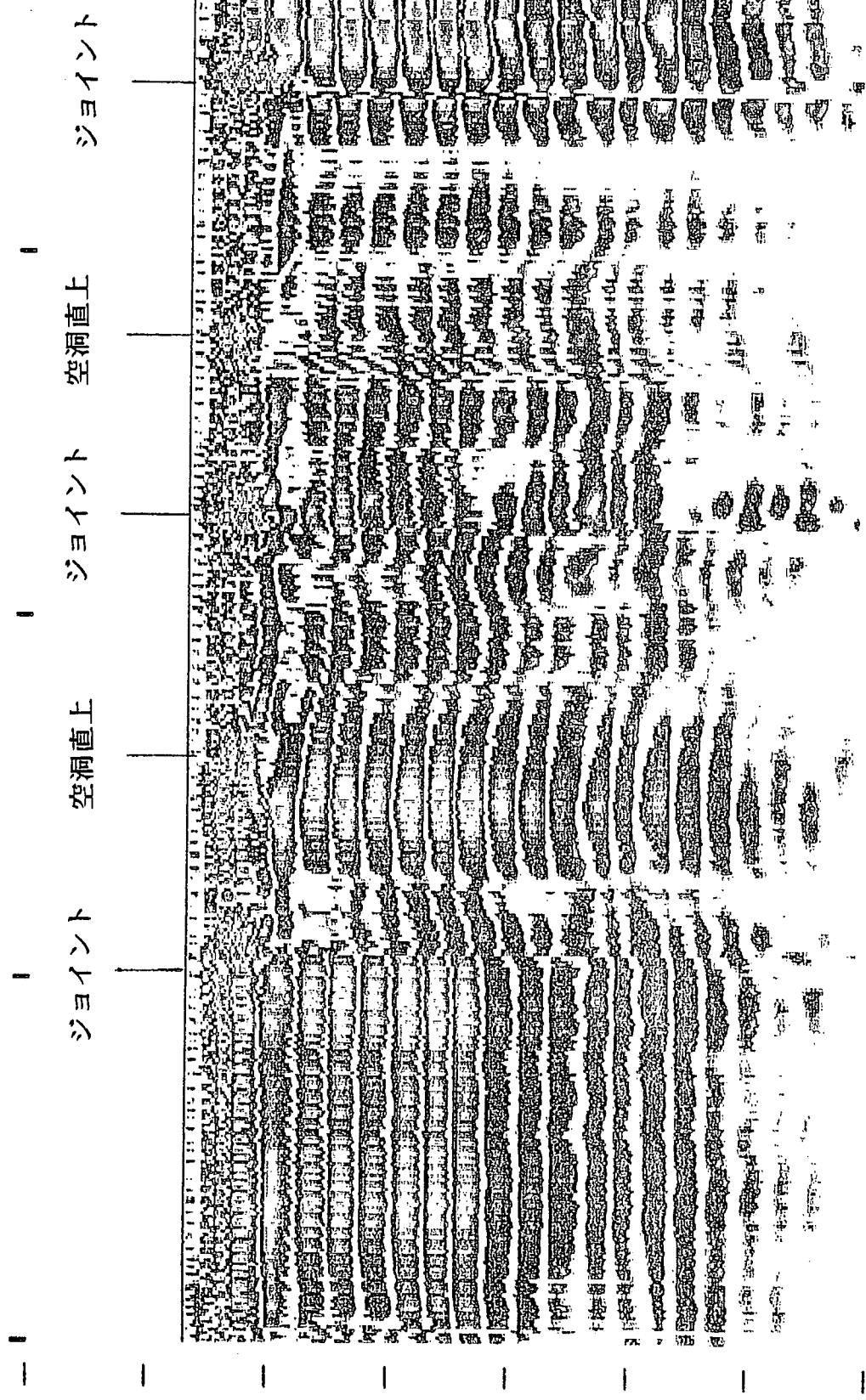
(空洞が存在することを承知の上での認識であり、明確に認識できたとはいえない。)

C ; 認識不可。

表-2. 2 実験結果一覧表

| 実験条件    |         |      | ヒューム管 |      | 対応結果<br>(レーダ断面図) |
|---------|---------|------|-------|------|------------------|
| アンテナ    | 周波数     | タンパー | B1 種  | B2 種 |                  |
| KSD9-20 | 1000MHZ | モルタル | A     | C    | 2-3、2-10         |
|         |         | 空隙   | B     | —    | 2-4、             |
|         |         | 水    | B     | —    | 2-5、             |
|         | 500MHZ  | モルタル | B     | C    | 2-6、2-11         |
|         |         | 空隙   | A     | B    | 2-7、2-12         |
|         |         | 水    | A     | C    | 2-8、2-13         |
| KSD8-20 | 500MHZ  | モルタル | A     | C    | 2-8、2-13         |
|         |         | 空隙   | A     | —    | 2-9、             |

— ; 実験なし



アンテナ ; KSD9-20

周波数 ; 1000MHZ

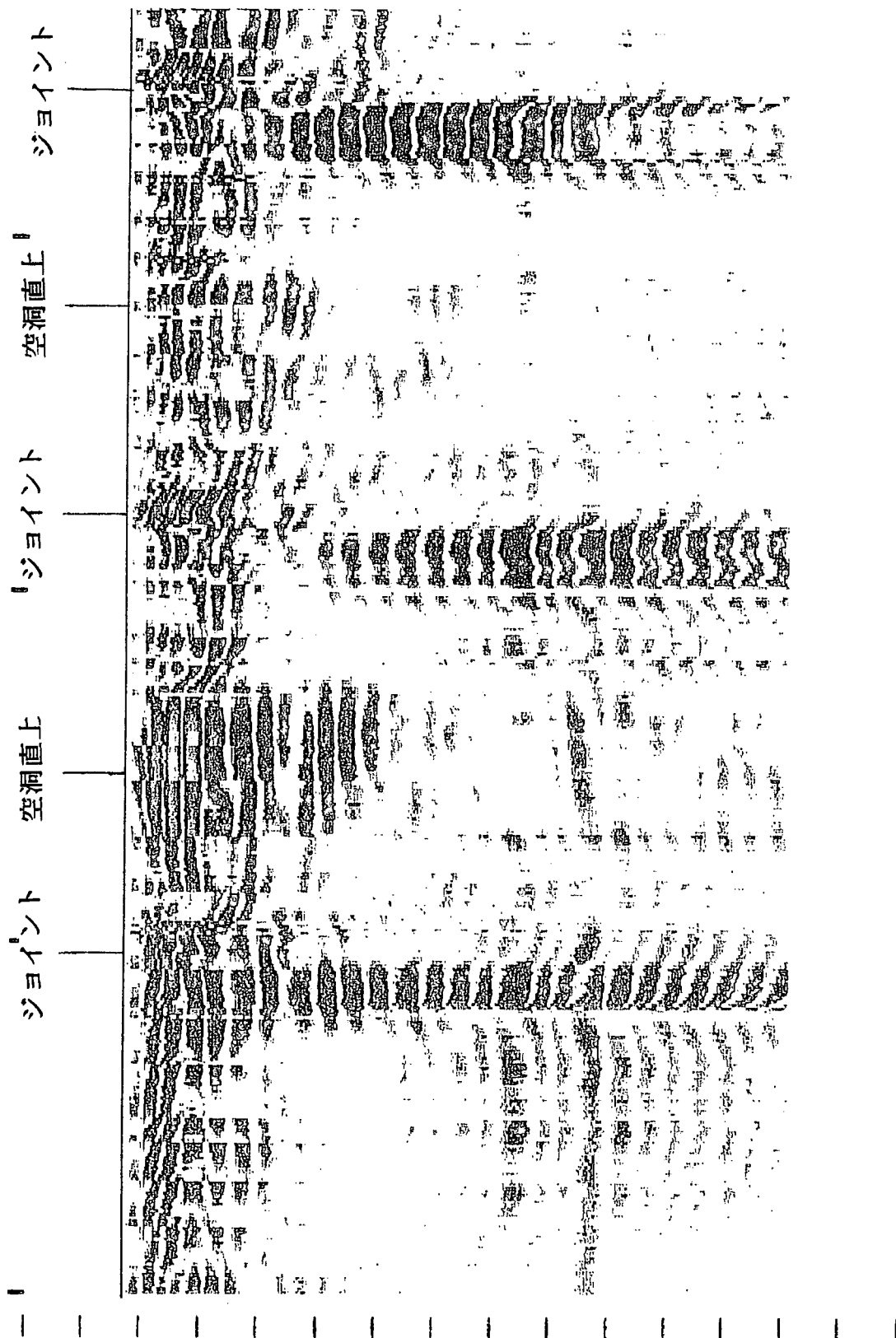
ガンパー ; モルタル

対象物 ; ヒューム管B1種

評価 ; A

図-2. 3

結果図 (差分図)



アンテナ ; KSD9-20

周波数 ; 1000MHZ

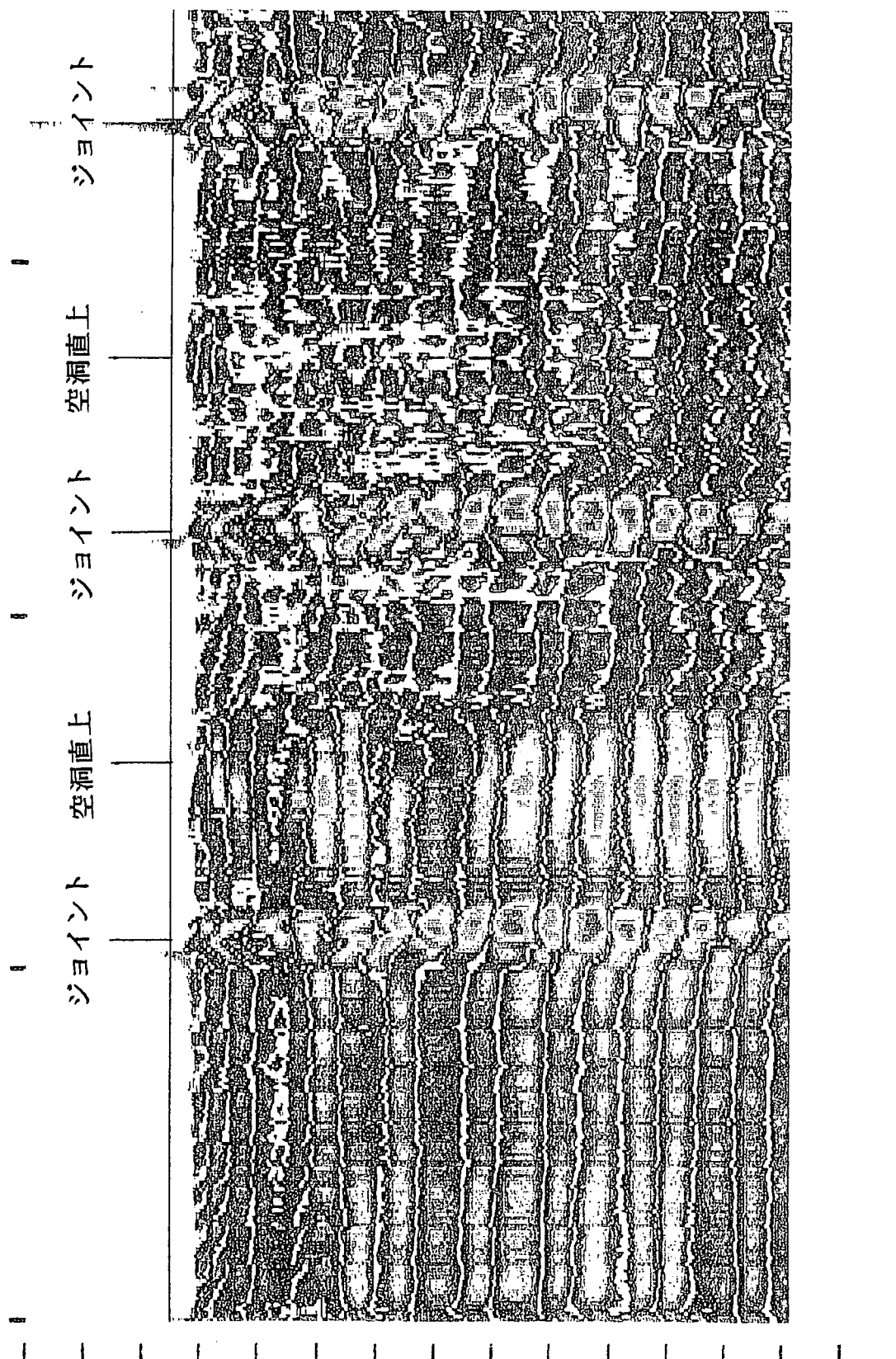
ゲイン ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B 1種

評価 ; B

図-2. 4

結果図 (差分図)



7777 ; KSD9-20

周波数; 1000MHZ

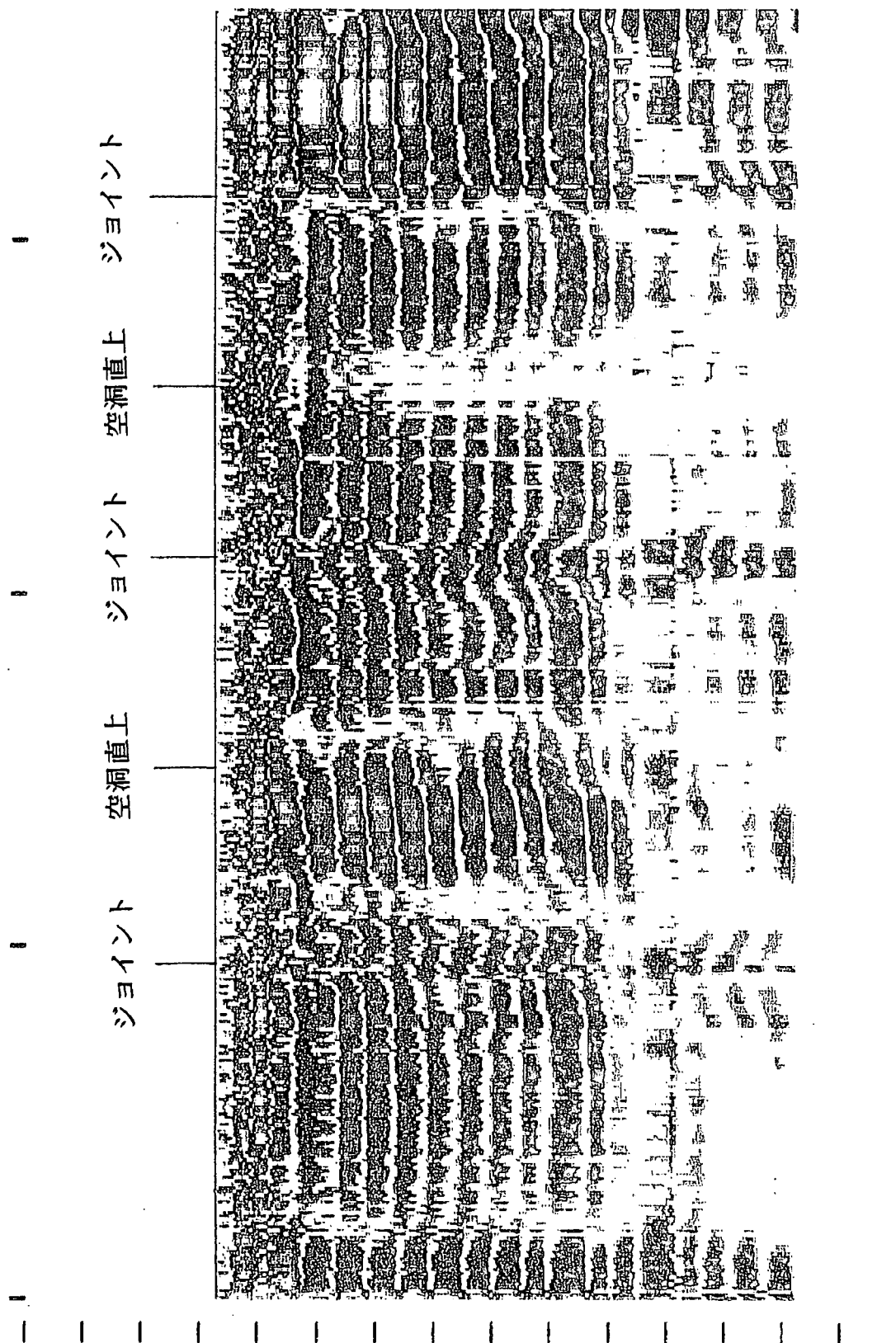
タンパー; 水袋

対象物; ヒューム管B 1種

評価; B

図-2. 5

結果図 (差分図)



7777 ; KSD9-20

周波数 ; 500MHZ

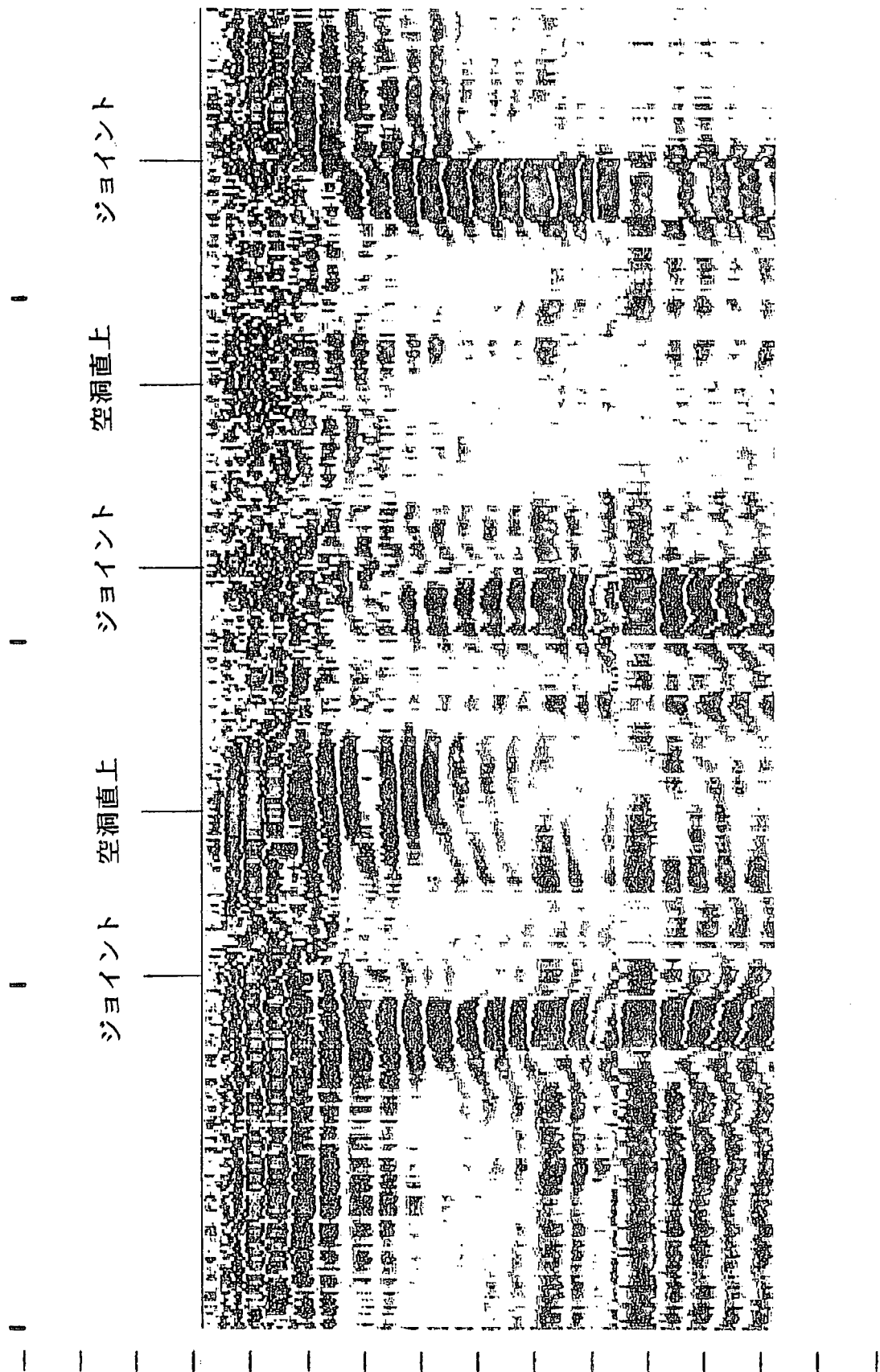
タンパー ; モルタル

対象物 ; ヒューム管B 1種

評価 ; B

図-2. 6

結果図 (差分図)



7777 ; KSD9-20

周波数 ; 500MHZ

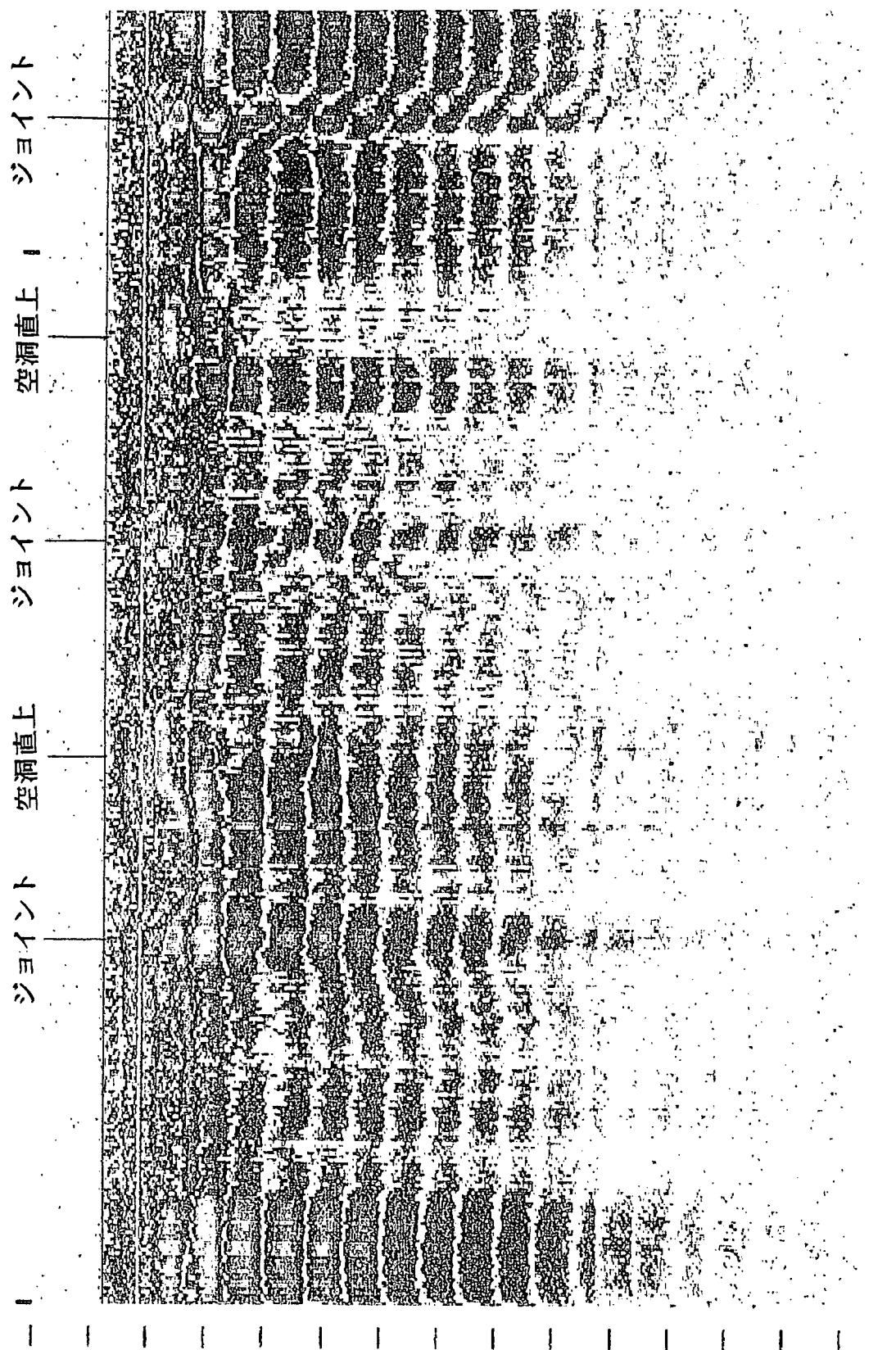
ゲンバー ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管 B 1 種

評価 ; A

図-2. 7

結果図 (差分図)



アンテナ ; KSD8-20

周波数 ; 500MHZ

ガンパー ; モルタル

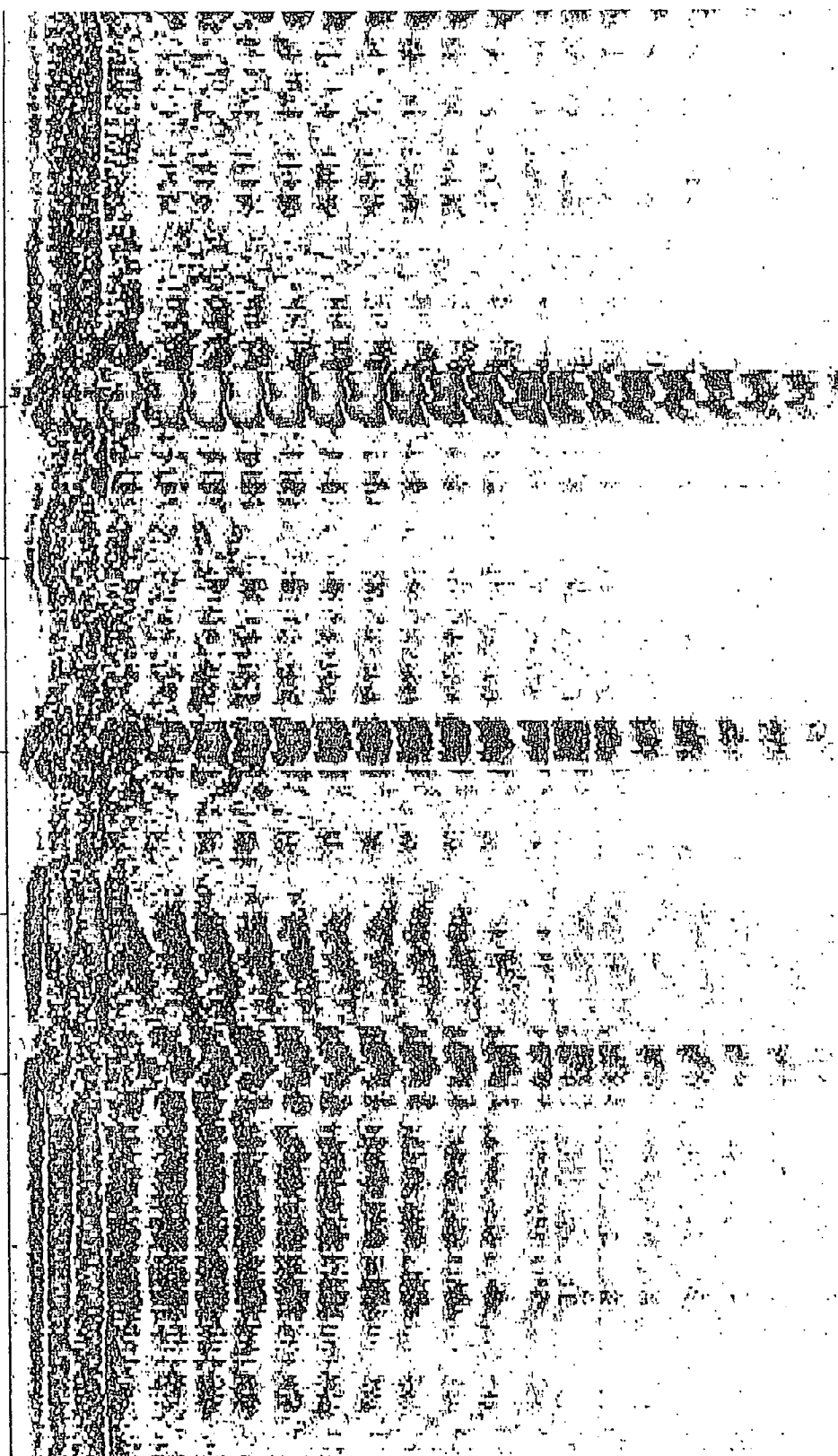
対象物 ; ヒューム管B 1種

評価 ; A

図-2. 8

結果図 (差分図)

ジョイント 空洞直上 ジョイント 空洞直上 ジョイント



アンテナ ; KSD8-20

周波数 ; 500MHZ

ゲイン ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B1種

評価 ; A

図-2. 9

結果図 (差分図)

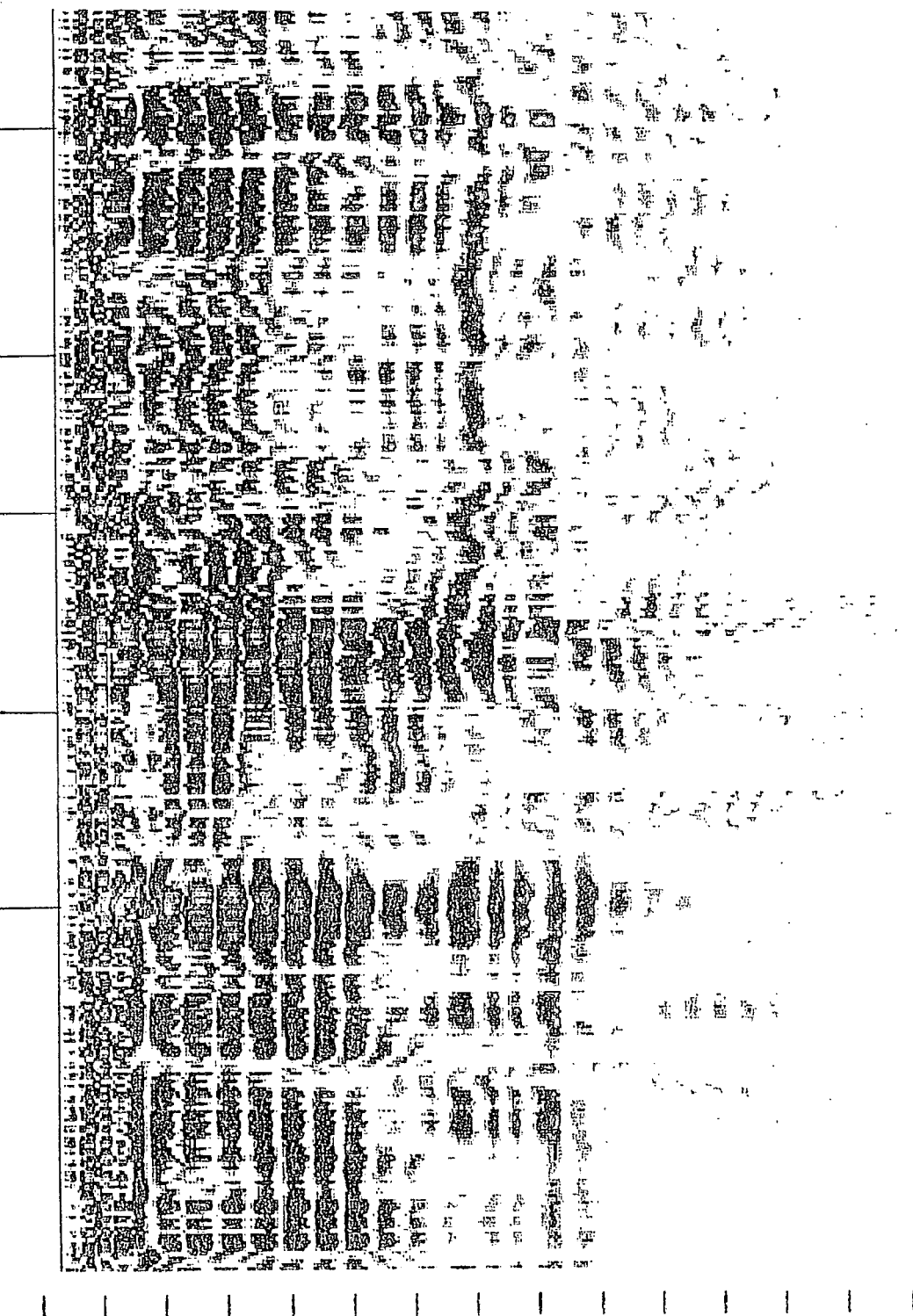
ジョイント

空洞直上

ジョイント

空洞直上

ジョイント



アンテナ ; KSD9-20

周波数 ; 1000MHZ

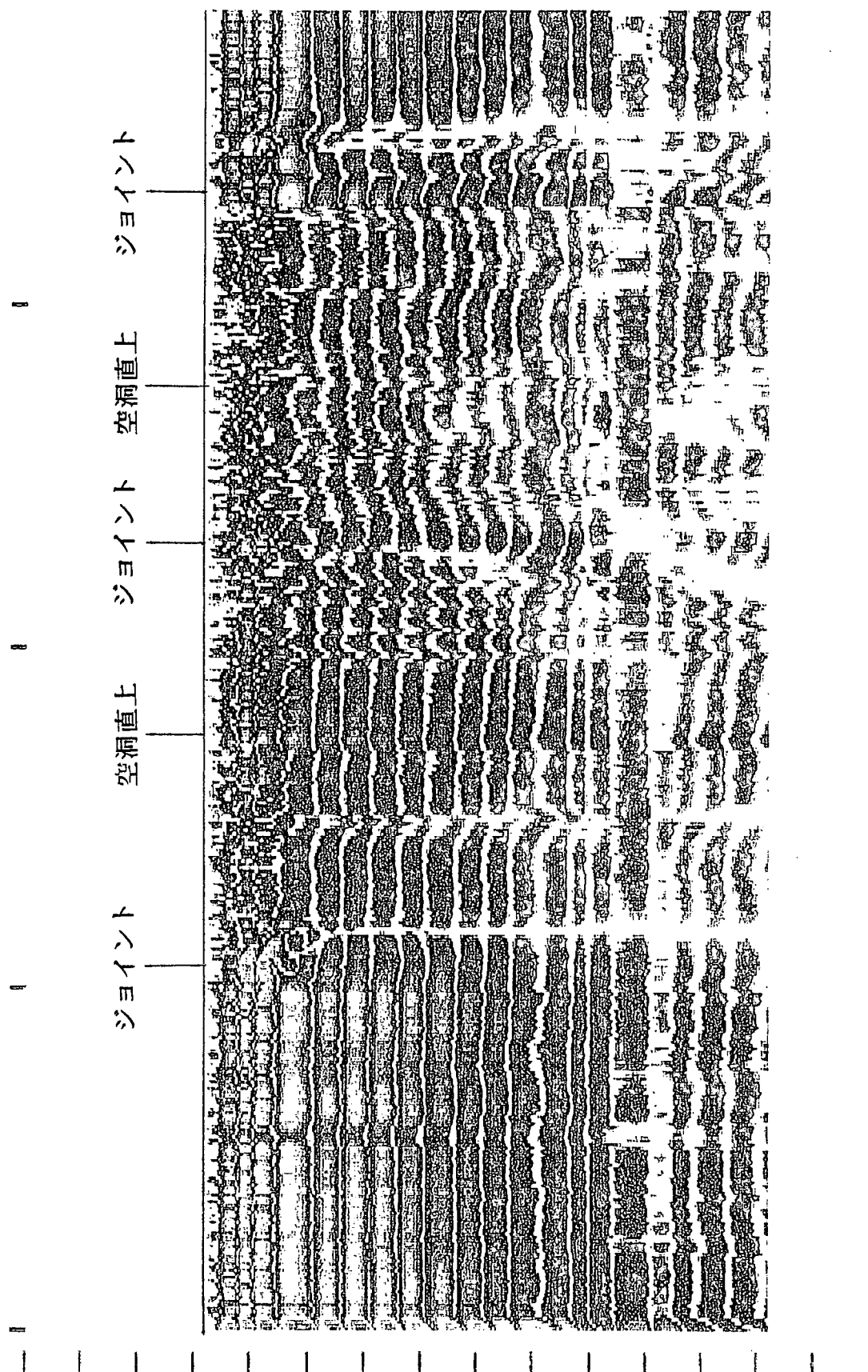
ガンパ- ; モルタル

対象物 ; ヒューム管B 2種

評価 ; C

図-2. 10

結果図 (差分図)



アンテナ ; KSD9-20

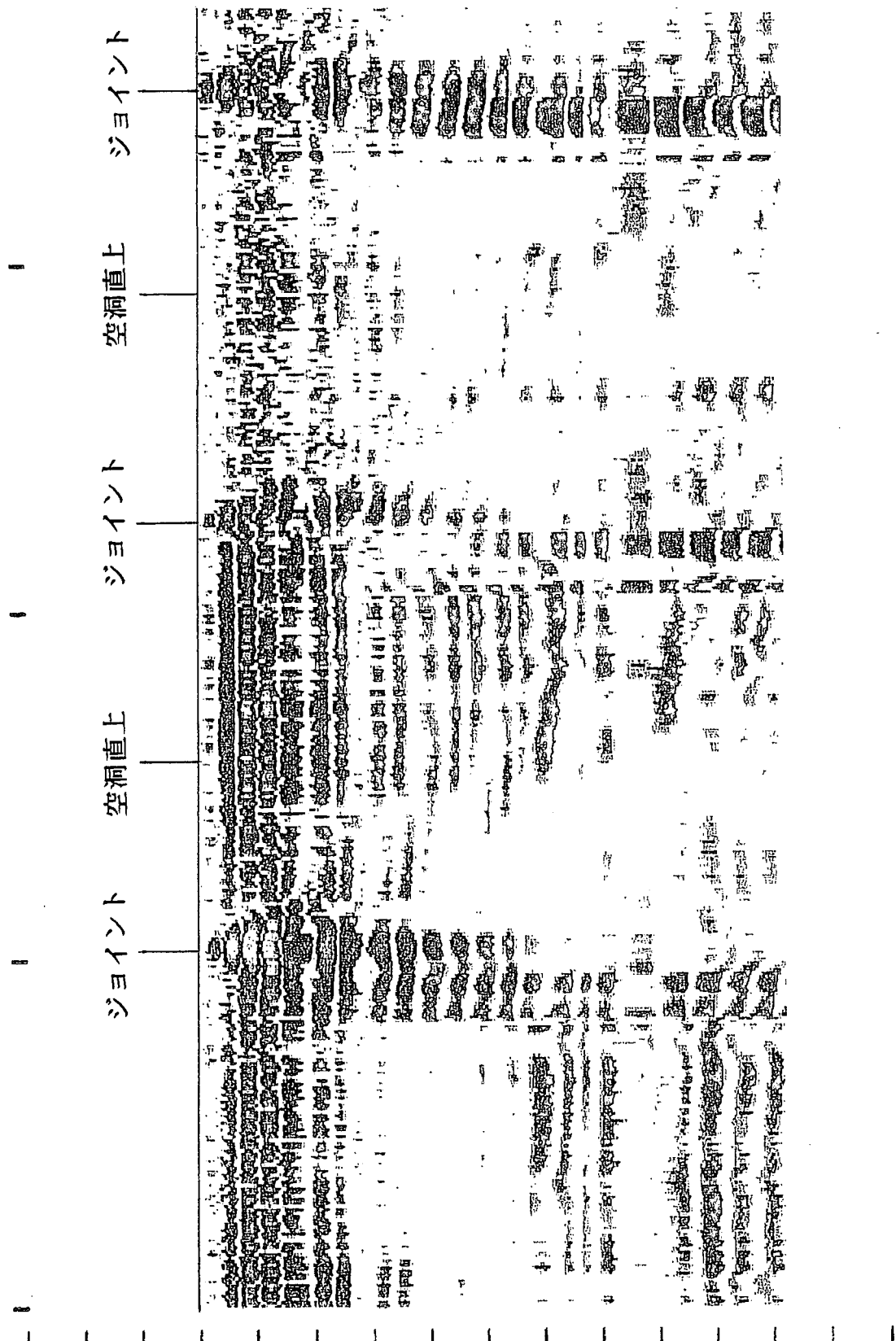
周波数 ; 500MHZ

ダンパー ; モルタル

対象物 ; ヒューム管B 2種 評価 ; C

図-2. 11

結果図 (差分図)



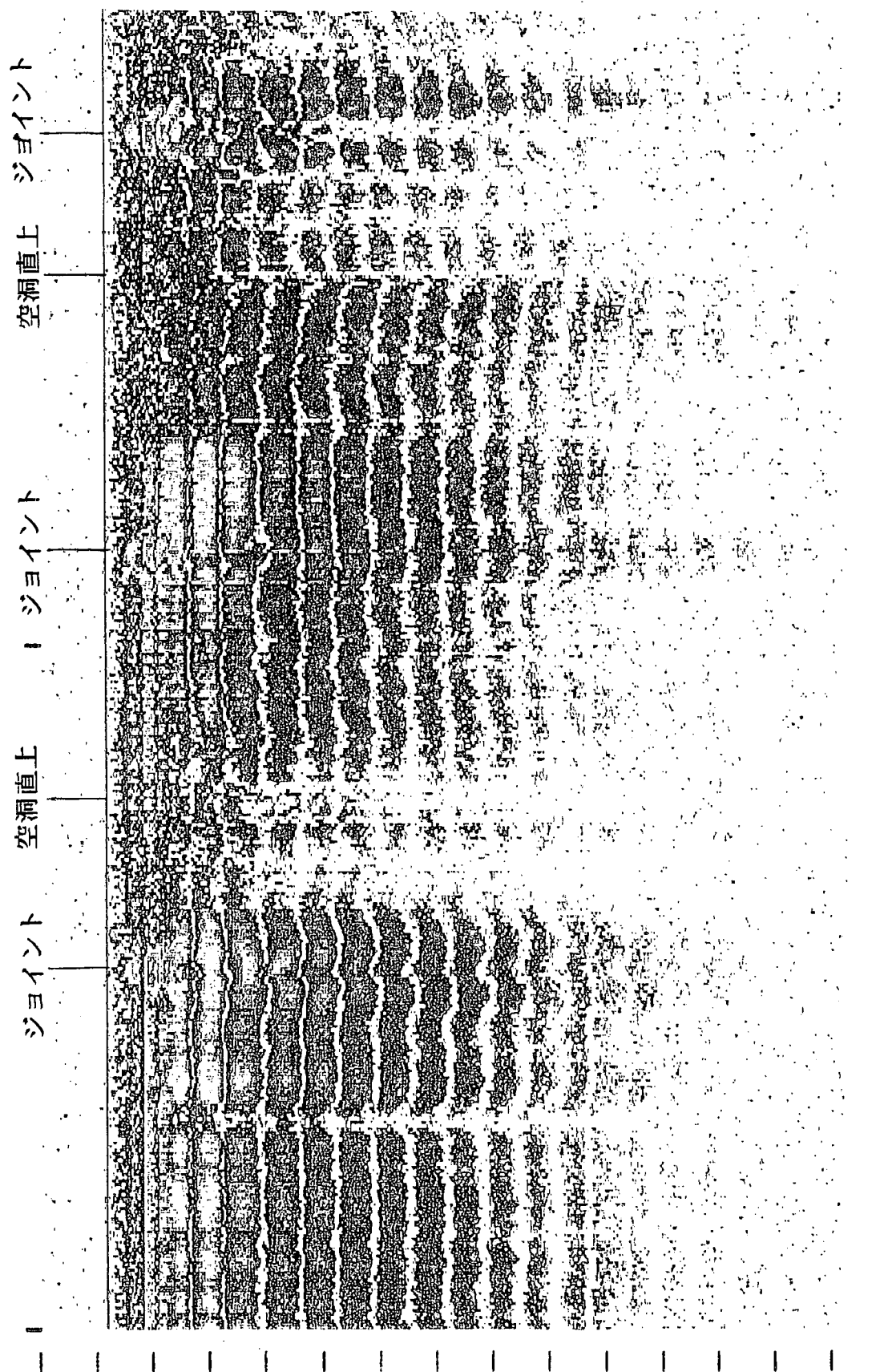
7777 ; KSD9-20

周波数; 500MHZ      タンパー; なし (空隙)

対象物; ヒューム管B 2種

評価; B

図-2. 12      結果図 (差分図)



アンテナ ; KSD8-20

周波数 ; 500MHZ

ゲイン ; モデル

対象物 ; ヒューム管B 2種

評価 ; C

図-2. 13 結果図 (差分図)

## 2. 5 波形処理効果

局所構造の検出に有効と考えられる各種解析処理の効果を検討した。いずれも処理速度においてはリアルタイム化が可能なものである。各波形処理の概要を以下に示す。

### 1) 差分処理

各波形を平均化したリファレンス波形を作成し、これを各波形から差分する。局所変化はこれにより強く抽出され、最も効果が期待できる処理といえる。すでにリアルタイム化され、現計測時で実施することが可能である。

### 2) フィルター処理

ブラックマン・ウィンドー関数を時間領域で各トレースとコンボリューションすることにより、必要帯域以外の周波数成分を除去する。抽出したい反応の周波数性が明確に異なる場合に有効な処理である。

### 3) デコンボリューション処理

記録波形を時間幅の短いパルス波形に圧縮する。各トレースに共通する基本波形を抽出し、基本波形をパルス波に変換する逆フィルターを作成し、この逆フィルターと各トレースをコンボリューションすることによって反射係数列の抽出を行う。この結果、反射波はより繊細且つ強調されて表現され、より認識度合いが高くなる。

図-2. 14に未処理図、図-2. 15～図-2. 17に処理図を示した。また総合的に波形処理を組み合わせたものを図-2. 18に示した。解析効果とそのリアルタイム性の両者を考慮し、次に示す基準で評価した。

- A ; 処理効果が得られ、且つ現状レベルにおいてもリアルタイム化が可能である。
- B ; 処理効果が得られたが、結果の良否は調査技術者に依存され、現状レベルではリアルタイム化は難しいとおもわれるもの。
- C ; 処理効果が得られなかった。

### (考察)

#### ・差分処理 (図-2. 15) 評価A

効果は最も大きく、局所変化を抽出する解析処理として最も有効的であった。処理速度が速く、且つ解析パラメータを選定する必要性が少ないことから、計測と併せて用いるリアルタイム化が容易に可能になる。

この方法には、以下の手法がある。

- ①全情報を平均化させた波形を各波形から差分するもの

②任意波形を選定し、これを各波形から差分するもの

③差分対象波形に対し、これを中心とする固定枠の中からの平均波形を作成し、対象波形から差分するもの、この時固定枠は対象波形の移動と連動する。

③が最も大きな効果が得られるものと考えられるが、これは固定枠の範囲が抽出対象となる局所変状よりも大きい必要があり、且つその差が小さい場合程効果は大きい。しかし、ヒューム管等の均一構造の影響を差分したい場合、一般的には検出データも均一となることが考えられ、①でも効果の差は少ない。また①を採用する場合、固定枠の範囲等解析パラメータの設定が必要ないため、解析実施者に依存されない。

#### ・フィルター処理 (図-2. 16) 評価B

ヒューム管に影響される反射波の周波数帯域と空洞や地盤中情報に関わる周波数帯域は一般に異なる。今回においても明確に周波数特性が異なったため、空洞反応に着目した周波数フィルターを通過させることによりその効果が得られた(使用したフィルターは400MHZ ~ 700MHZ バンドパスフィルターである)。効果は差分処理程大きくなく、且つ有効な周波数帯を選定するまでには波形に対する認識力や時間を要した。今回においては採用パラメータが有効であったが、地盤条件が変わることにより、その周波数特性も変化することもあるため、即リアルタイム化は難しいものと考えられる。

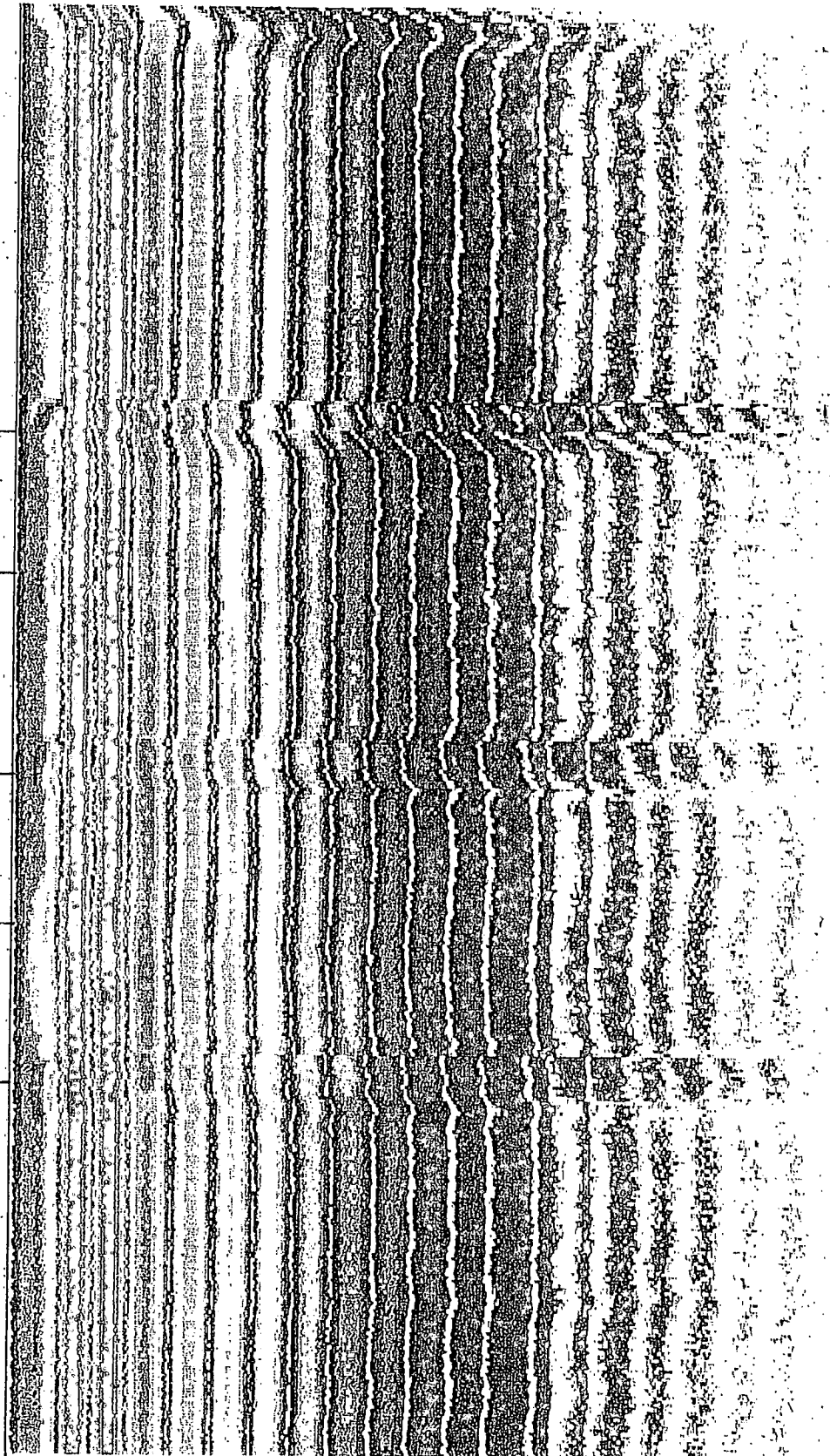
#### ・デコンボリューション処理 (図-2. 17) 評価A

アンテナ～ヒューム管～地盤の経緯で発生する反射波は非常に強く、また歪み波形(リソング)が深部まで派生し、それ以下の情報を不鮮明にさせる。デコンボリューション処理により、反射波の抽出やリソングが除去されるため全体の反射波強度が落ち、見かけ上他の反応との区別が不鮮明となっており、差分処理との組み合わせにより高い効果が得られると考えられる。今回実施したデコンボリューションフィルターの種類は、スパイクデコンボリューションと呼ばれるものである。これは、解析パラメータを問われず且つ計算速度が速いため、差分処理と並び、リアルタイム化が容易な解析手法である。

#### ・2手法の組み合わせ (図-2. 18) 評価A

評価Aとした差分処理およびデコンボリューション処理を組み合わせた処理内容である。解析順番は、デコンボリューション→差分処理とした。現状レベルの解析技術考えた場合、上記2手法の組み合わせが有効と考えられる。今後、基本能力の向上化(後述)も考えていかねばならないが、容易に現行レベルを向上できるリアルタイム解析装置を開発することも重要である。また、解析パラメータ設定に技術力を問われる解析方法も、幾通りもの組み合わせを瞬時に演算するもの(ファジー性が必要)、また波形としての捉え方ではなく、画像処理からの解析方法等を試作・検討する段階となったと考えられる。

ジョイント 空洞直上 ジョイント 空洞直上 ジョイント



アンテナ ; KSD8-20

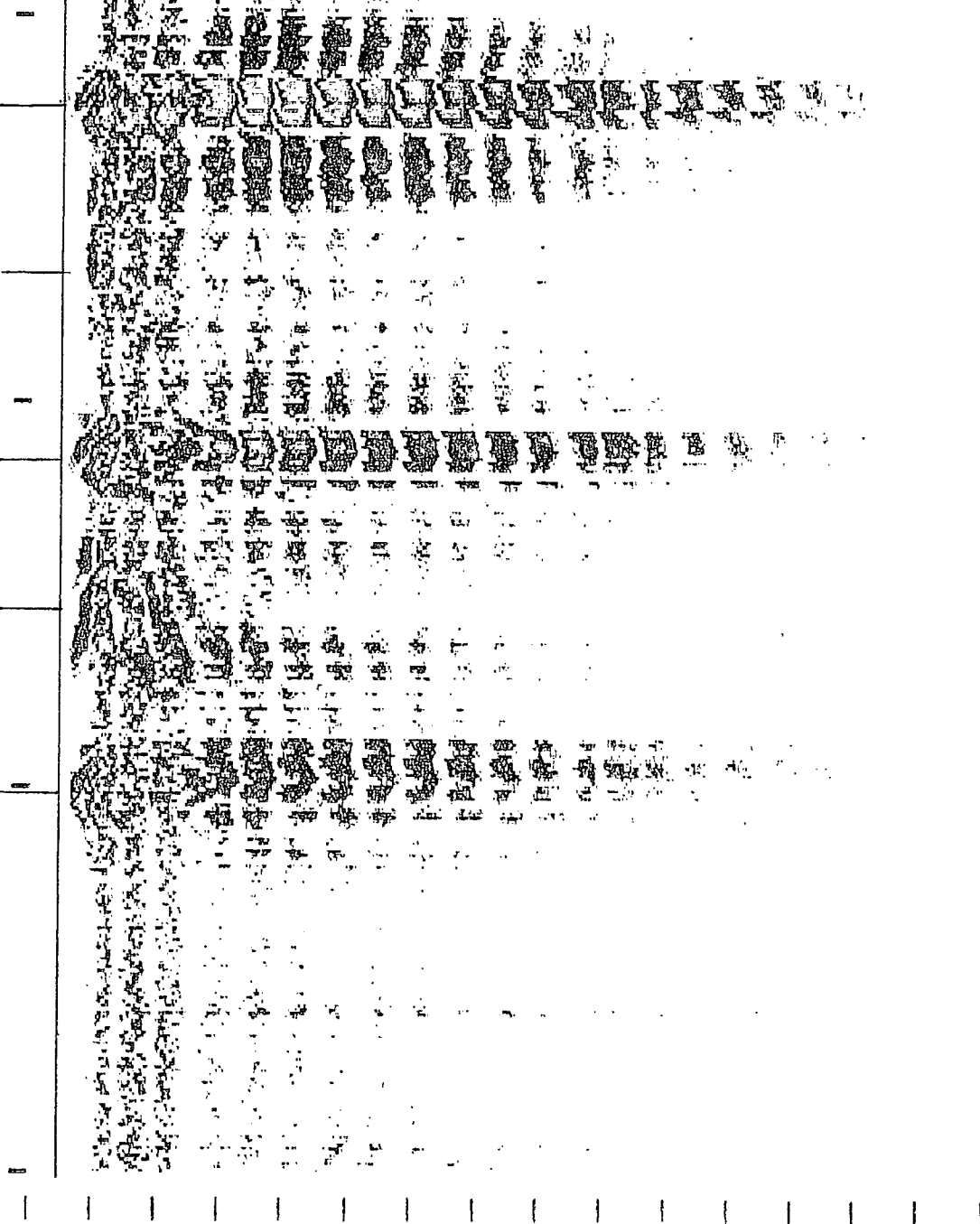
周波数 ; 500MHZ

ゲイン ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B 1種

図-2. 14 未処理図

ジョイント 空洞直上 ジョイント 空洞直上 ジョイント



アンテナ ; KSD8-20

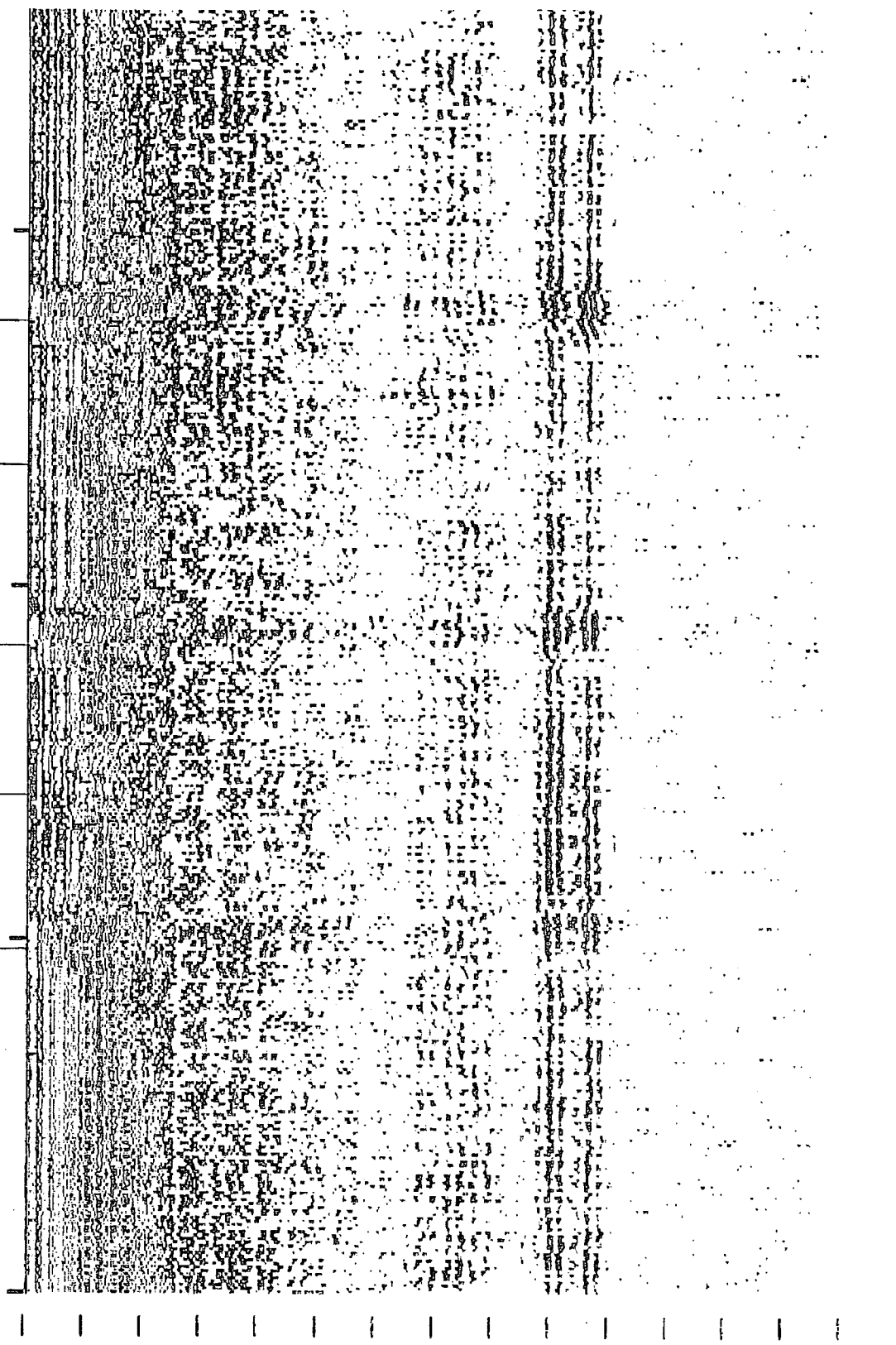
周波数 ; 500MHZ

ゲイン ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B1種

図-2. 15 差分図

ジョイント ジョイント 空洞直上 空洞直上 ジョイント ジョイント



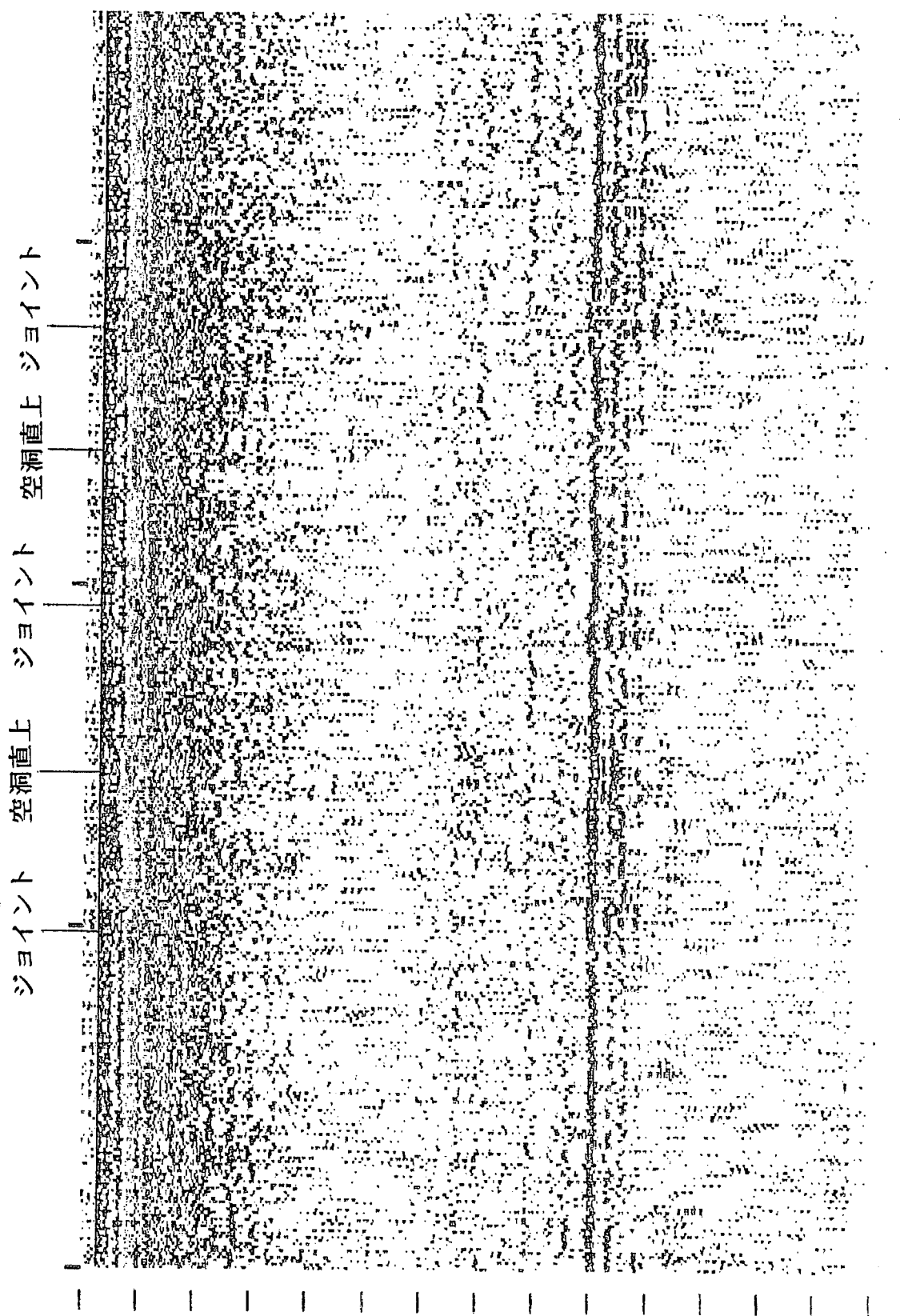
アンテナ ; KSD8-20

周波数 ; 500MHZ

ゲイン ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B 1種

図-2. 16 フィルター図



アンテナ ; KSD8-20

周波数 ; 500MHZ

ダンパー ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B 1種

図-2. 17 デコンボリューション図

ジョイント  
空洞直上  
ジョイント  
空洞直上  
ジョイント



アンテナ ; KSD8-20

周波数 ; 500MHZ

ゲイン ; なし (空隙)

対象物 ; ヒューム管B 1種

図-2. 18 総合解析図

## 2. 6 2チャンネル計測

ヒューム管には必ず継ぎ手が存在し、これに影響された反応は必ず発生することとなる。基本的には定間隔に配置されるものであるため、データ取得後においても認識は可能と思われるが、継ぎ手下に空洞が存在するような場合、判断が難しくなることも予想される。これをクリアできる単純な解決方法に2チャンネル計測が考えられる。これは同時に2箇所計測を実施し、お互いを相互差分するものである。この時重要なことは、一方はヒューム管下を対象とし直下の空洞検出を目的とするが、一方は空洞の存在しにくいヒューム管側方に配置する必要がある。今回、ヒューム管下に空洞がある場合とそうでない場合において同様の計測を実施し、両者の相互差分解析を実施した。図-2. 19に相互差分に用いた未処理画像とそれらを用いて差分を行った画像を示す。2チャンネル計測を想定した相互差分断面は、継ぎ手反応のみではなく通常の差分処理では除去が難しいヒューム管自体が影響する不連続反応についても差分することができた。今後1回の計測で相互差分が可能となる2チャンネル計測器を開発する有効性は高く、構造物反応の除去に関してもその効果は高いことが確認できた。

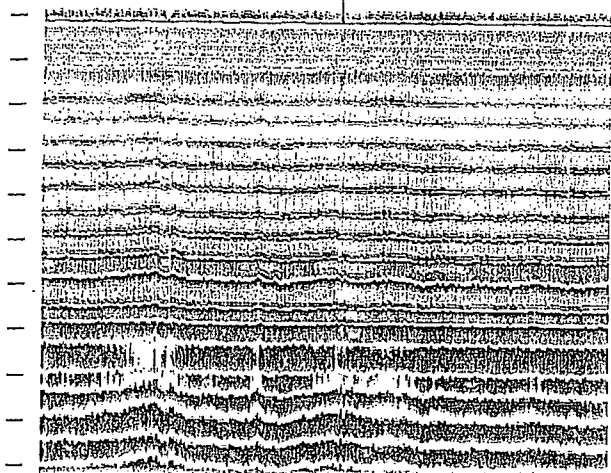
## 2. 7 考察

下水道管（ヒューム管）周辺空洞探査実験に関する考察を以下にまとめた。

- 1) B1種に関しての検出性は、1000MHzの検出性が良好であった。しかしながら管内水がある場合、非常に悪影響を受け空洞反応を認識することは出来なかった。波形処理を加えたものについても検出性は悪いため、空洞探査を行う場合は管内水を締め切る必要がある。
- 2) B2種における空洞の検出性は悪く、また波形解析を実施しても顕著な変化は見られなかった。このため、装置改良等の見直しが必要と考えられる。
- 3) B2種に関して今後の発展を望む場合、より高周波数用に設計されたアンテナを使用することが考えられる。送信周波数1500MHz程度を考えて設計された超小型アンテナに対し、段階的に送信周波数を変更できる装置を開発することが現状で考えられる打開点であると思われる。
- 4) ヒューム管はらせん巻であるため、鉄筋の方向が限定され共振方向が規定されることから、これに対し、アンテナ配列を逆にすれば共振はキャンセルされ、下部構造の検出性が向上する。
- 5) 解析手法のリアルタイム化は容易なものと考えられ、これにより検出性は向上すると思われる。

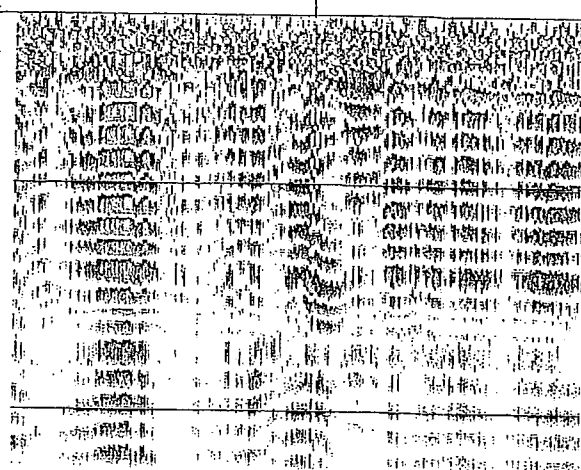
①  
(ヒューム管下空洞無)

ジョイント



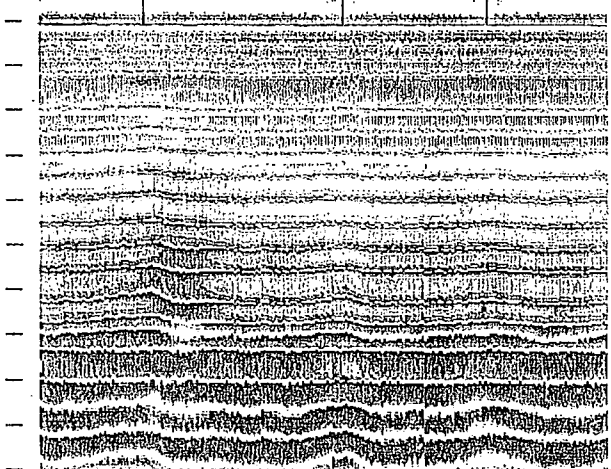
②  
(①断面差分図)

ジョイント



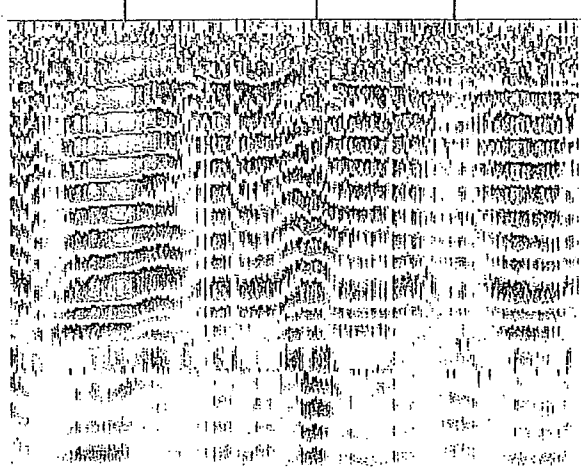
③  
(ヒューム管下空洞有)

空洞直上      ジョイント      空洞直上



④  
(③断面差分図, 図3-1-4と同じ)

空洞直上      ジョイント      空洞直上



⑤  
(①-④を実施し、差分処理を加えたもの)

空洞直上      ジョイント      空洞直上

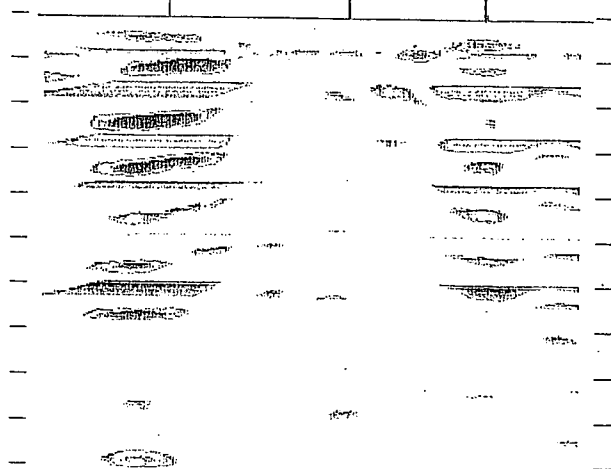


図-2. 19 2チャンネル計測による差分画像

### 3. RCボックスカルバート周辺空洞探査実験

#### 3. 1 RCボックスカルバート

図-3. 1に実験に使用した2種類のボックスカルバートの配筋図を示す。

##### 1. RCボックスカルバート (RC①およびRC②各2連配列)

寸法 : 1350×1350×2000mm (共通、1体)

内径 : 1100×1100mm (共通)

床版厚 : 125mm (共通)

配筋 : RC① 100×100mmダブル配筋

RC② 150×150mmダブル配筋

##### 2. 空洞 (発砲スチロール製 (EPS製))

寸法 : 幅1000×長さ2000×厚0~500mm (三角状)

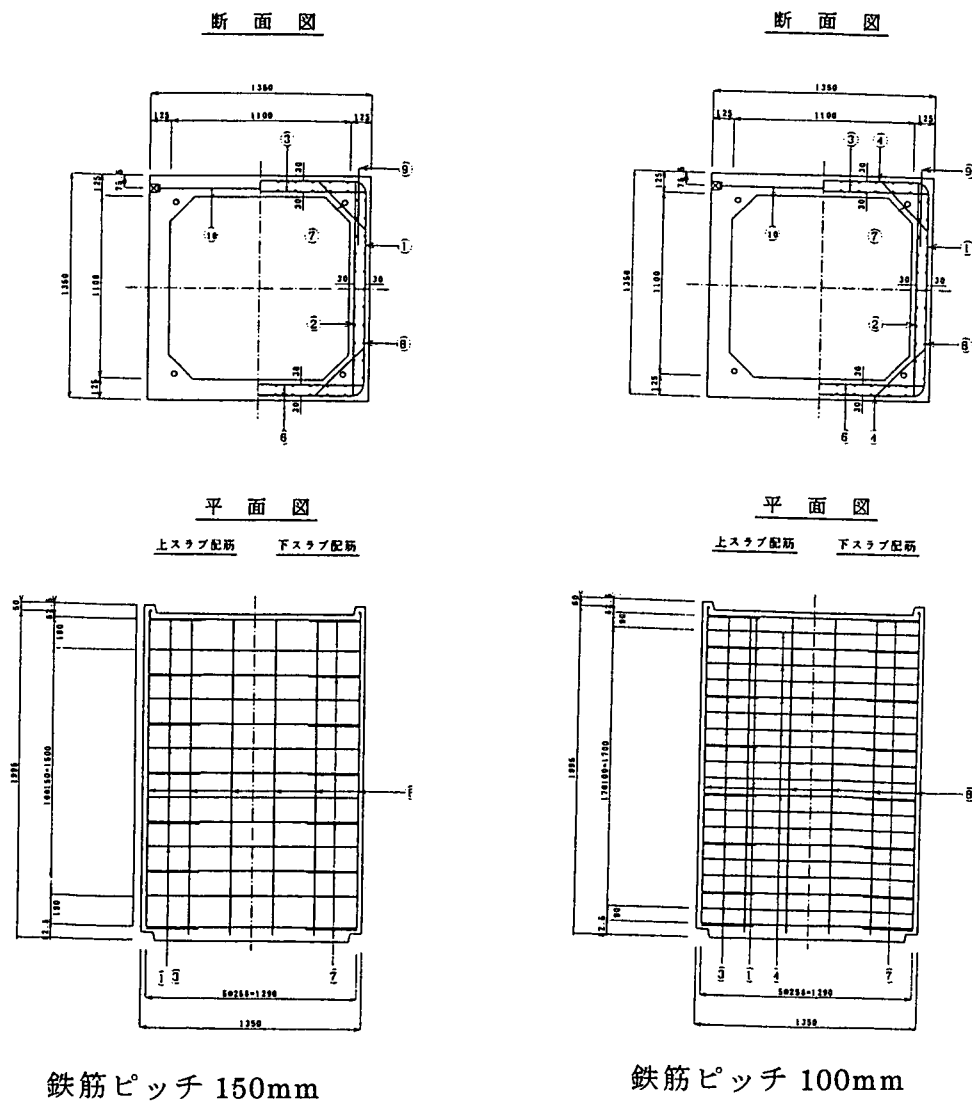
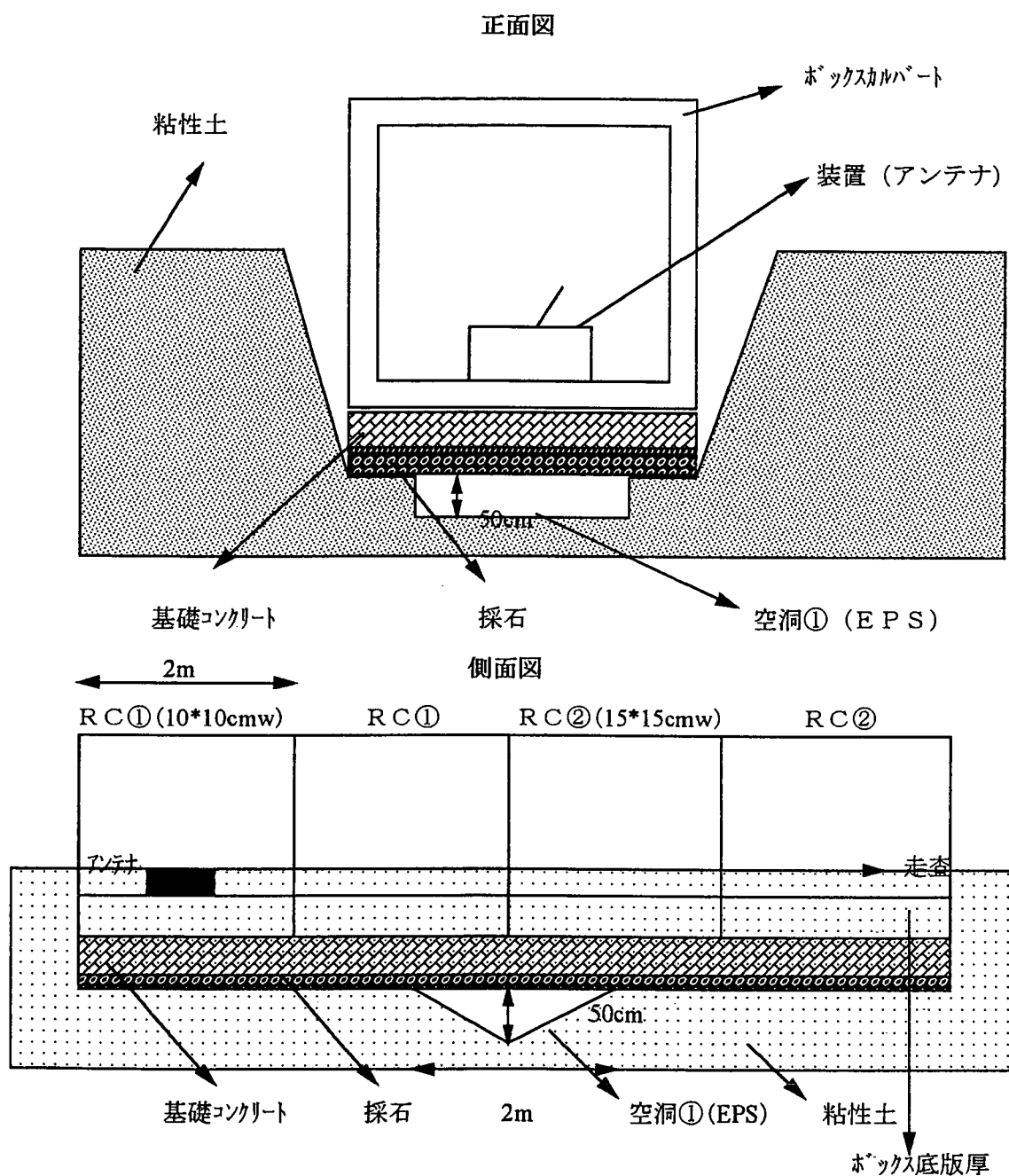


図-3. 1 ボックスカルバート配筋図

### 3. 2 実験地盤

図－3. 2に実験モデルの概略図を示す。また、以下に実験地盤の仕様を示す。



図－3. 2 実験地盤

### 3. 3 実験装置

本実験では前年度使用装置におけるKSD8－20を使用した。主仕様および特徴は表－2. 1を参照することとする。

### 3. 4 実験条件

本実験の主目的は、現状装置におけるRC構造物周辺空洞探査における配筋状況に対する適用性を明確にするための実験である。以下に実験条件として考慮する項目を示す。

- ①鉄筋間隔15×15cmダブル配筋以上の適用性の確認
- ②上記スペックにおいて底版直下に水位を伴う場合の適用性の確認
- ③鉄筋間隔10×10cmダブル配筋の床版への適用性の確認
- ④上記スペックにおいて底版直下に水位を伴う場合の適用性の確認

本実験は、以上の実験条件において空洞の検出性を確認し、現状での適用範囲を決定するものである。

### 3. 5 実験結果

#### 3. 3. 1 RCボックスカルバート下空洞検出実験

実験に使用したレーダの送信周波数は1000MHzである。図-3.3にRC①およびRC②における空洞検出実験について、底版下に水位を持たない場合の実験結果を示した。上段に実験モデル、中段に生データ、下段に波形処理（差分処理・フィルター処理）後の解析結果を示した。その他の波形処理も実施したが、有効ではなかったため示していない。

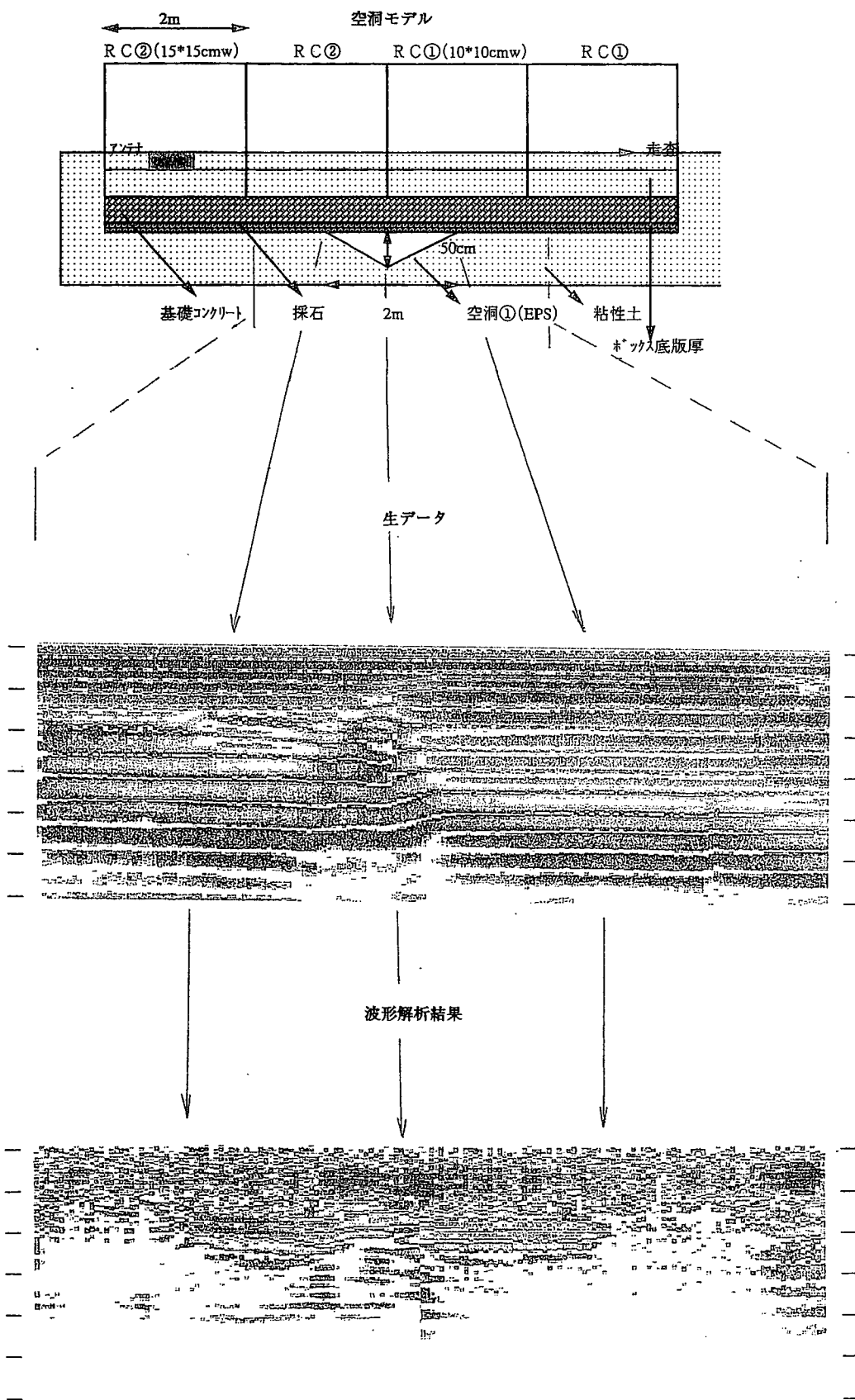
表-3.1 図-3.3における波形解析内容

| 処理内容  | RC①                                  | RC②                                  |
|-------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 差分処理  | 移動型差分処理                              | 移動型差分処理                              |
| フィルター | 500～1000MHz帯域抽出フィルター<br>(バンドパスフィルター) | 500～1000MHz帯域抽出フィルター<br>(バンドパスフィルター) |

図-3.4に両ボックスカルバートにおける空洞検出実験において、底版下に水位を持つ場合の実験結果を示した。上段に実験モデル、中段に生データ、下段に波形処理後の解析結果を示した。実施した波形処理内容を下表に示す。

表-3.2 図-3.4における波形解析内容

| 処理内容  | RC①                                 | RC②                                 |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 差分処理  | 移動型差分処理                             | 移動型差分処理                             |
| フィルター | 200～700MHz帯域抽出フィルター<br>(バンドパスフィルター) | 200～700MHz帯域抽出フィルター<br>(バンドパスフィルター) |



送信周波数：1000MHz 底板下水位：無し

図-3.3 RCボックスカルバート下空洞検出実験結果

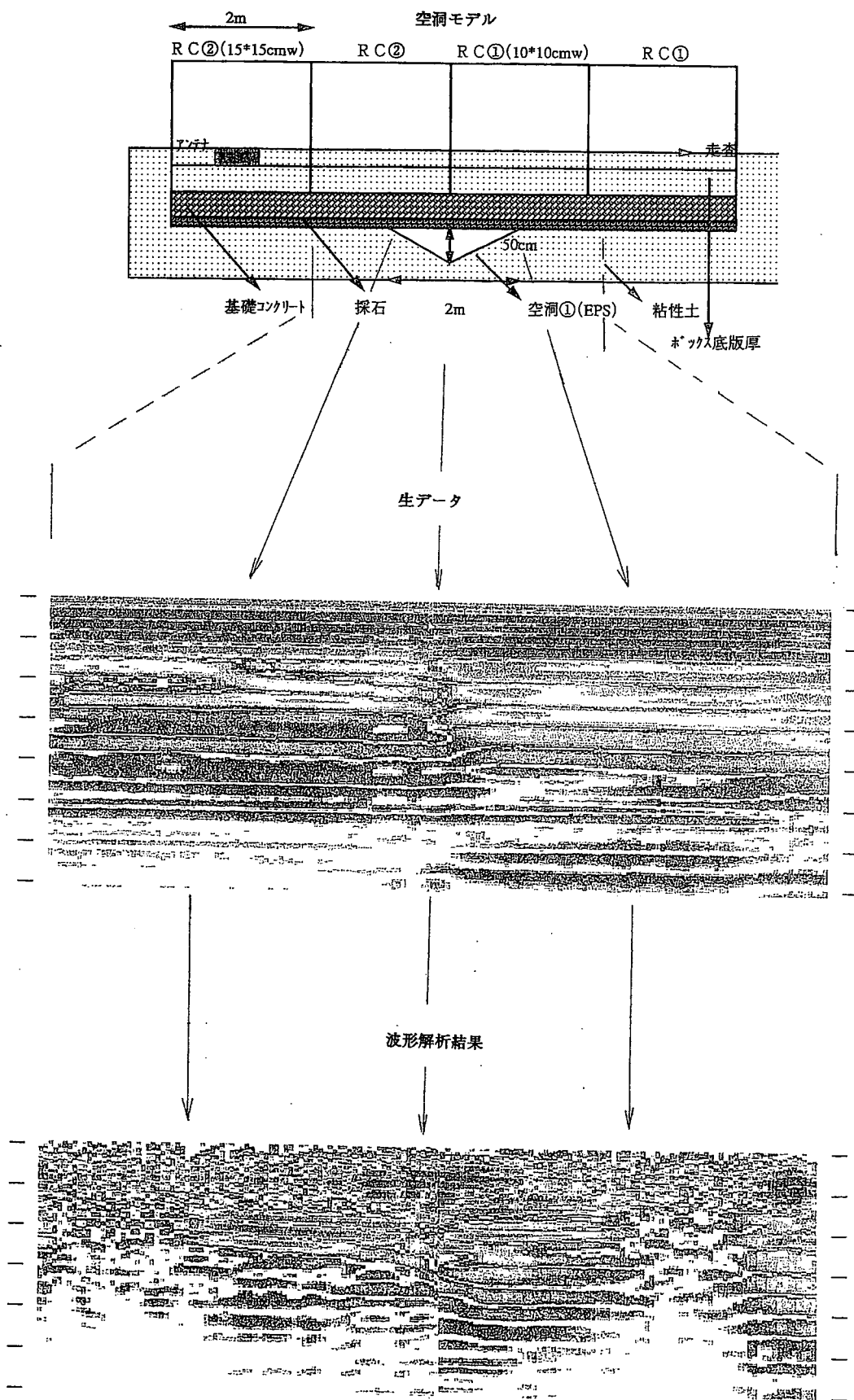


図-3.4 RCボックスカルバート下空洞検出実験結果

### 3. 6 考察

R Cボックスカルバート下空洞検出実験の結果に関する考察を以下に示す。

- 1) R C② (15cm 間隔ダブル配筋) では生データの段階において空洞は明確に検出されており、現行装置において十分に空洞探査は可能なものと判断される。また底版下に水位を持つ場合においても検出性に大きな差異は無かった。
- 2) R C① (10cm 間隔ダブル配筋) については、生データの段階では若干ながら空洞設定箇所に変化反応が見られる程度であった。生データを重要視する場合、実探査に導入することは難しいものと判断される。
- 3) R C① (10cm 間隔ダブル配筋) について波形解析処理を実施した場合、空洞反応は非常に明確化された。この状況であれば空洞反応を十分に認識できるものとする。また、今回実施した波形処理内容は現地計測段階においても実施できる内容のものであるため、現地観測装置が波形処理機能を有する場合において空洞探査は可能であると判断できる。

### 4. まとめ

以上の結果と既往の研究成果をあわせて、地中レーダによる鉄筋コンクリート構造物周辺地盤の空洞探査の適用範囲を表-4に整理した。ただし、これらは地盤と空洞との誘電率の差が大きい条件の場合で、地下水位が高く空洞内に水が存在するような誘電率の差が小さい条件においては可能性が小さくなると考えられる。

表-4 R C構造物周辺空洞探査の適用範囲

| 構造物 (配筋スペック)                     | 適用性 | 参考データ            | 備考                      |
|----------------------------------|-----|------------------|-------------------------|
| ヒューム管<br>(らせん筋間隔 6.5cm 以上)       | ○   | 図-2.18<br>図-2.19 | 未処理の状態で確認可能             |
| ヒューム管<br>(らせん筋間隔 3.5cm)          | ×   | 図-2.10<br>図-2.11 | 現行装置では難しいため、<br>装置改良が必要 |
| ボックスカルバート<br>(15 × 15cm ダブル配筋以上) | ○   | 図-3.3<br>図-3.4   | 未処理の状態で確認可能             |
| ボックスカルバート<br>(10 × 10cm ダブル配筋)   | △   | 図-3.3<br>図-3.4   | 波形解析が必要                 |

## 5. 今後の課題

一般的な施工条件で使用されている鉄筋ピッチの粗いヒューム管B1種や15 cm × 15 cm でダブルピッチのボックスカルバートであれば、地中レーダにより周辺地盤の空洞を探查できる可能性が非常に高いことが確認できた。今後は実現場において現場適用性の確認を行うとともに実用化に向けた装置のシステム化、自動化の検討を行う必要がある。また、ヒューム管B2種や10 cm × 10 cm 以下のダブルピッチを有するボックスカルバート等の鉄筋ピッチの細かい、また厚みのある構造物に対する適用性の拡大を図るために、鉄筋間隔を考慮した高周波小型形状アンテナの開発、送信出力の向上、高周波増幅回路の開発、画像処理技術の向上等の検討を行う必要がある。また、解析パラメータ設定に幾通りもの組み合わせを瞬時に演算できるようなファジーやニューラルコンピューティング等による解析手法を検討していく予定である。

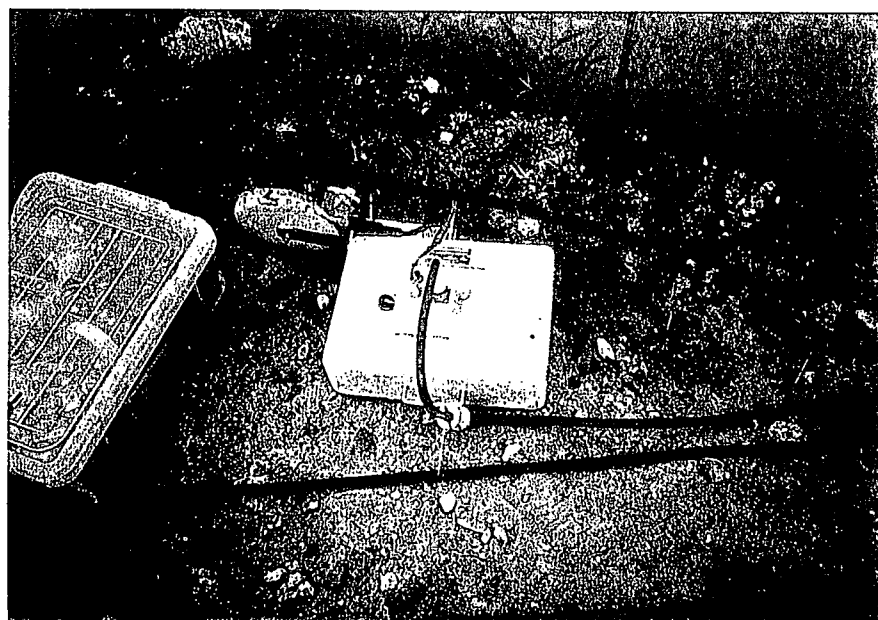
参考文献：

- 1) 苗村、境他、土木研究所資料第 2762 号、堤体の非破壊調査機器に関する調査、1989
- 2) 市村、森他、土木研究所資料第 3333 号、樋門樋管の空洞探査補修技術に関する調査、1995
- 3) 国土技術開発研究センター、河川構造物の非破壊探査システムに関する検討報告書、  
1996

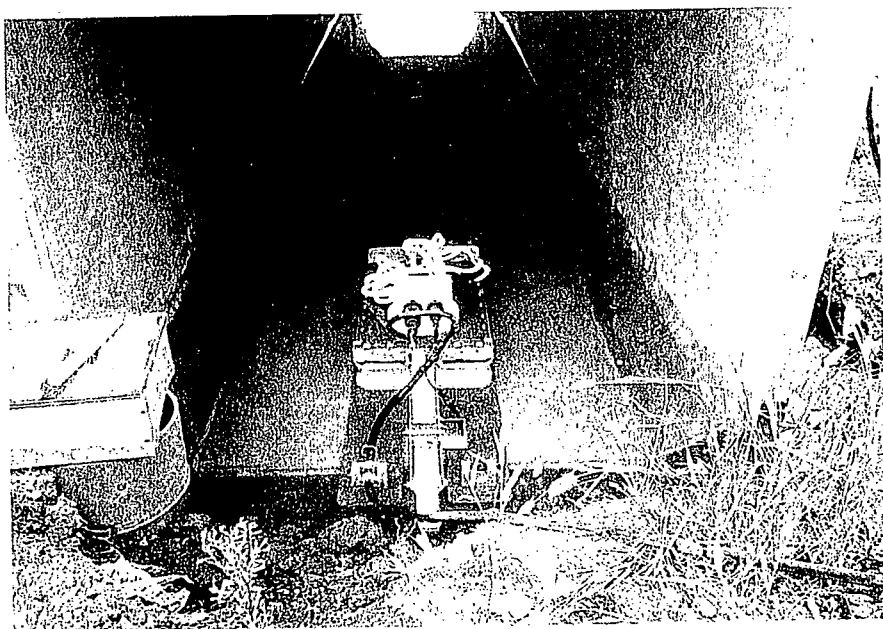
## 実験状況写真



制御・収録部



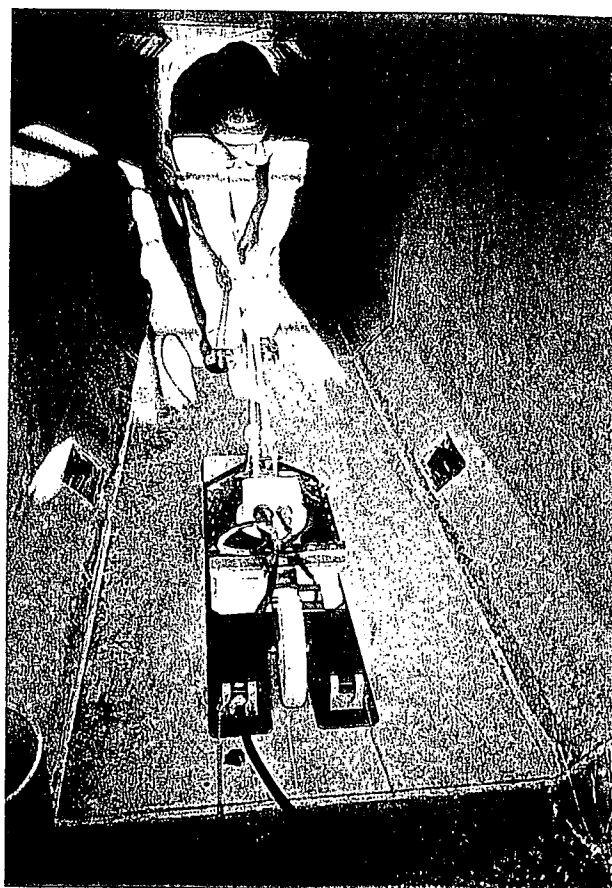
アンテナ (KSD8-20)



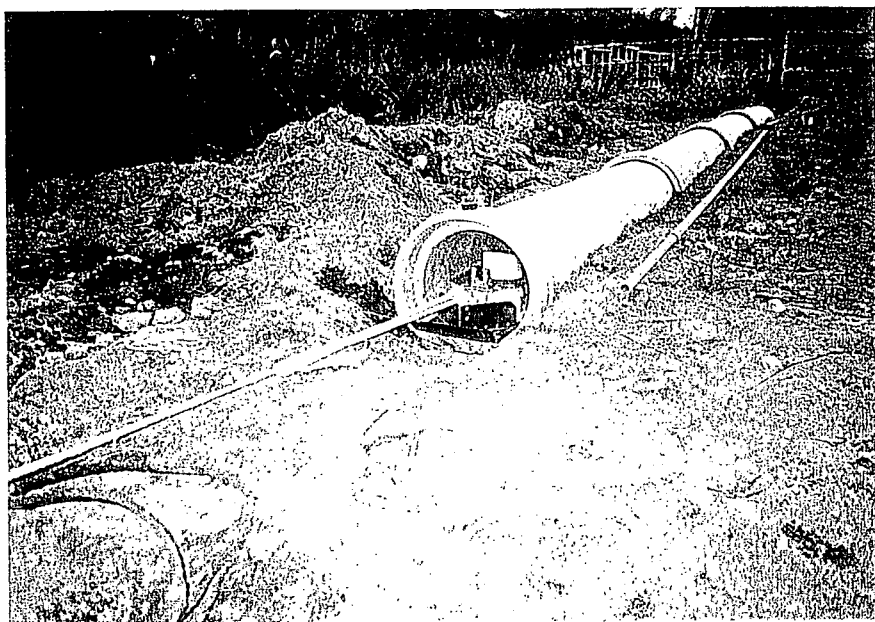
アンテナ (KSD9-20)



計測風景



計測風景（RCボックスカルバート）



計測風景（ヒューム管）

## 地中レーダによる空洞探査の手引き（案）

## 目次

### Ⅱ. 地中レーダによる空洞探査の手引き (案)

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 1. 総則                       | 1  |
| 1. 1 目的                     | 1  |
| 1. 2 適用範囲                   | 2  |
| 1. 3 用語の解説                  | 3  |
| 1. 4 手引きの利用法                | 5  |
| 1. 5 地中レーダ探査の位置付け           | 7  |
| 1. 6 地中レーダ探査の概略・原理          | 8  |
| 1. 7 地中レーダ装置の基本構成や特性        | 12 |
| 2. 探査編                      | 14 |
| 2. 1 RC構造物周辺空洞探査            |    |
| (樋門・樋管、ボックスカルバート、踏掛け版)      | 14 |
| 2. 1. 1 適用範囲                | 14 |
| 2. 1. 2 装置 (アンテナ) の選定       | 15 |
| 2. 1. 3 探査の方法               | 15 |
| 2. 1. 4 探査事例                | 17 |
| 2. 2 下水道管周辺空洞探査 (ヒューム管等埋設管) | 19 |
| 2. 2. 1 適用範囲                | 19 |
| 2. 2. 2 装置 (アンテナ) の選定       | 20 |
| 2. 2. 3 探査の方法               | 20 |
| 2. 2. 4 探査事例                | 22 |
| 2. 3 トンネル覆工背面空洞探査           | 23 |
| 2. 3. 1 適用範囲                | 23 |
| 2. 3. 2 装置 (アンテナ) の選定       | 24 |
| 2. 3. 3 探査の方法               | 24 |
| 2. 3. 4 探査事例                | 26 |
| 3. 解析編                      | 28 |
| 4. 探査装置                     | 31 |

## 1. 総 則

### 1. 1 目 的

この手引きは、地中レーダ法を用いた構造物周辺空洞の非破壊調査（以下「地中レーダ探査」という）の適用範囲及び技術的な資料を示すものであり、調査及び施工管理の円滑化を図ることを目的とする。

#### （解説）

既存構造物周辺の地盤はゆるみやすく、空洞化することもある。このような空洞は地下浅部や構造物近隣に発生することが多く、地表陥没や構造物破損等の事故を引き起こす原因となる。このため、地下空洞を未然に調査し対策を施すことは、防災上、極めて重要な調査事項である。

構造物周辺の空洞の有無や分布状況を把握する調査には、地盤沈下や構造物の変状等を観察する目視踏査、物理探査により空洞の有無や分布状況を把握する調査、試掘による確認調査がある。これらをもって対策計画および対策施工に進むものであり、特に物理探査結果の良否が重要となる。

構造物周辺の空洞を調査できる物理探査法は、地中レーダ法が一部実用に供されているが、的確な技術情報が少なく、関係者に理解されていない点が多い。しかしながら、空洞の検出能力や作業効率の良さからこのような地中レーダ法を活用する必要性が生じてきている。これら現状を踏まえると、工事の計画、設計、施工管理を担当する関係者に対し地中レーダ探査についての理解と積極的な活用を促すことが必要である。

上述した状況を背景に、この手引きは、地中レーダ探査の実施を検討するために必要な適用範囲及び技術的な資料を簡単に分かりやすく示し、調査計画及び施工管理の円滑化を図ることを目的に作成した。

## 1. 2 適用範囲

この手引きは、以下に示す構造物の周辺に発生している空洞の調査に適用する。

- 1) R C構造物周辺空洞（樋門・樋管、ボックスカルバート、踏掛け版）
- 2) 下水道管下空洞（ヒューム管等埋設管）
- 3) トンネル覆工背面空洞（在来工法による山岳トンネル、NATM トンネル等）

なおこの手引きは道路路面下の空洞や埋設物調査に則して作成していないため、そのまま転用でき得るものではない。ただし、地中レーダ法の適用範囲には十分に含まれるものであり、その旨理解して使用すれば準用でき得るものである。

### （解説）

この手引きは、地中レーダ法による計測作業が構造物内から実施でき、その外周地盤を探索できる構造物を対象としている。また、手引きは過去の調査事例や実証実験を参考にして作成しているため、これらの資料から適用可能と判断された構造物を適用範囲としている。

- 1) R C構造物周辺空洞（樋門・樋管、ボックスカルバート、踏掛け版）
- 2) 下水道管下空洞（ヒューム管等埋設管）
- 3) トンネル覆工背面空洞（在来工法による山岳トンネル、NATM トンネル等）

手引きの作成にあたり、まず過去の調査事例や建設省の有する実験事例から概略的な適用範囲を設定し、その中から適用不明瞭と判断されたR C構造物に対し建設省土木研究所構内で検証実験を実施した。コンクリート床版やトンネル覆工面（シールドセグメントを除く）に対しては調査事例も多く、適用可能と判断した。

実証実験は、R C床版（ボックスカルバートで代用）及びヒューム管を使用し、その外周に製作した空洞の検出性を確認することで行った。R C床版は二重鉄筋構造のもの、ヒューム管はらせん配筋構造のものを使用し、どちらも各土木事業で実使用されているものである。

実証実験の結果は、両構造物共に多密配筋である場合（R C床版において配筋間隔 10cm 以下、ヒューム管において配筋間隔 3.5cm 以下）、明確な空洞反応が得られないことがあったが、上記以上の配筋間隔の場合では良好な空洞検出結果が得られた。また、既存するR C構造物の多くは 12.5cm 間隔以上の二重配筋構造であり、ヒューム管についても 6.5cm 間隔程度のらせん配筋が多くを占める。これらのことから、地中レーダ探査は、配筋を有

する構造物の背面空洞の調査においても既に実用段階になったことが判明した。

このような現状を踏まえて、この手引きは、今後益々増加するであろう構造物周辺の空洞化調査について、適切な調査方法の選定や計画、施工管理の円滑化に寄与しようとするものである。

### 1. 3 用語の解説

本手引きに使用した専門用語を以下に解説する。

#### 1. 物理探査法

地下に存在する物質の物理的性質に関して、人為的または自然的に生じた現象を測定し、その記録を解析することにより、地下構造の様相等、地下の状態を解明すること。利用する物理現象により、地震、電気、電磁気、磁気、重力、放射能等の各方法に分かれる。

#### 2. 地下空洞

本手引きでは構造物周辺の地中に発生する空洞を指す。

構造物近隣の土壌は締め固めが難しく、もともとゆるみやすい性質を持っている。これに加え、地下水の昇降や浸透流等に影響されて軟弱化が進んだ場合、最終的に空洞に発展する。

#### 3. 検知能力

本手引きでは地中レーダ装置の検知能力を指し、検出できる対象物の規模を示す目安値として使用している。本手引きでは波長や過去の実験例から判断されたおおよその数値を使用している。

#### 4. 電磁波

電磁波の自然界における存在の状態や物質との相互作用等は、ほぼ周波数（波長）によって支配される。このため周波数帯域によって適当に分割され、特定の名称を付して取り扱われている。地中レーダ探査で良く用いられる電磁波の周波数帯は、一般的には数 10MHz ～ 1000MHz 程度が考えられ、超短波（VHF、30 ～ 300MHz）および極超短波（UHF、300 ～ 3000MHz）に属する。

## 5. 誘電率（比誘電率）

伝媒定数または電気誘導容量であり、単位電界のもとで誘電体の単位体積中に蓄えられるエネルギーの大きさを表す（電束密度  $D$  と電界  $E$  との関係を、“ $D = \epsilon E$ ” と表す時の比例係数  $\epsilon$ ）。

MKS 単位系では  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$  と表し、 $\epsilon_0$  は真空誘電率という定数であり、 $\epsilon_r$  は物質により固有の数値を持つ。この  $\epsilon_r$  比誘電率という。

地中レーダ探査においては各物質の物性値を表す目安値として比誘電率が取り扱われ、主に比誘電率の異なる境界面において反射減衰が発生するものと考えられている。

また比誘電率と電磁波伝搬速度は関係があり、下式によって表される。

$$V \text{ (m/s)} = \frac{C \text{ (m/s)}}{\sqrt{\epsilon_r}} \qquad \begin{array}{l} C \text{ (m/s)} : \text{電磁波の空中伝搬速度} \\ \epsilon_r : \text{土の比誘電率} \end{array}$$

## 6. 導電率

媒体の電気の伝導度の目安値。これが高いと電磁波は減衰量が多くなり、探査できる深度が少なくなる。

## 7. 送信周波数

送信回路によって生成される電磁波の周波数を指し、この違いにより使用するアンテナも変わる。

## 8. 指向性

電波や音波の相対的放射振幅の方向特性。電力や音の強さの相対値で表す場合もある。放射強度が最大値の  $1/2$  になる角度幅をビーム幅または指向性の半値幅という。

地中レーダ装置（アンテナ）は一般的には  $90^\circ$  程度のビーム幅を持ち、円錐状に地下に伝搬していく。

## 9. 伝搬速度

電磁波が媒質中を伝わっていく速度。

## 10. 探査深度

地中レーダ探査が探査可能である深度。各種装置によって異なる。

### 11. 伝搬減衰

電磁波に限らず、波動は媒質を伝搬する際に減衰を伴うため、観測波形の振幅値は観測時間の経過と共に減衰する。

#### 1. 4 手引きの利用法

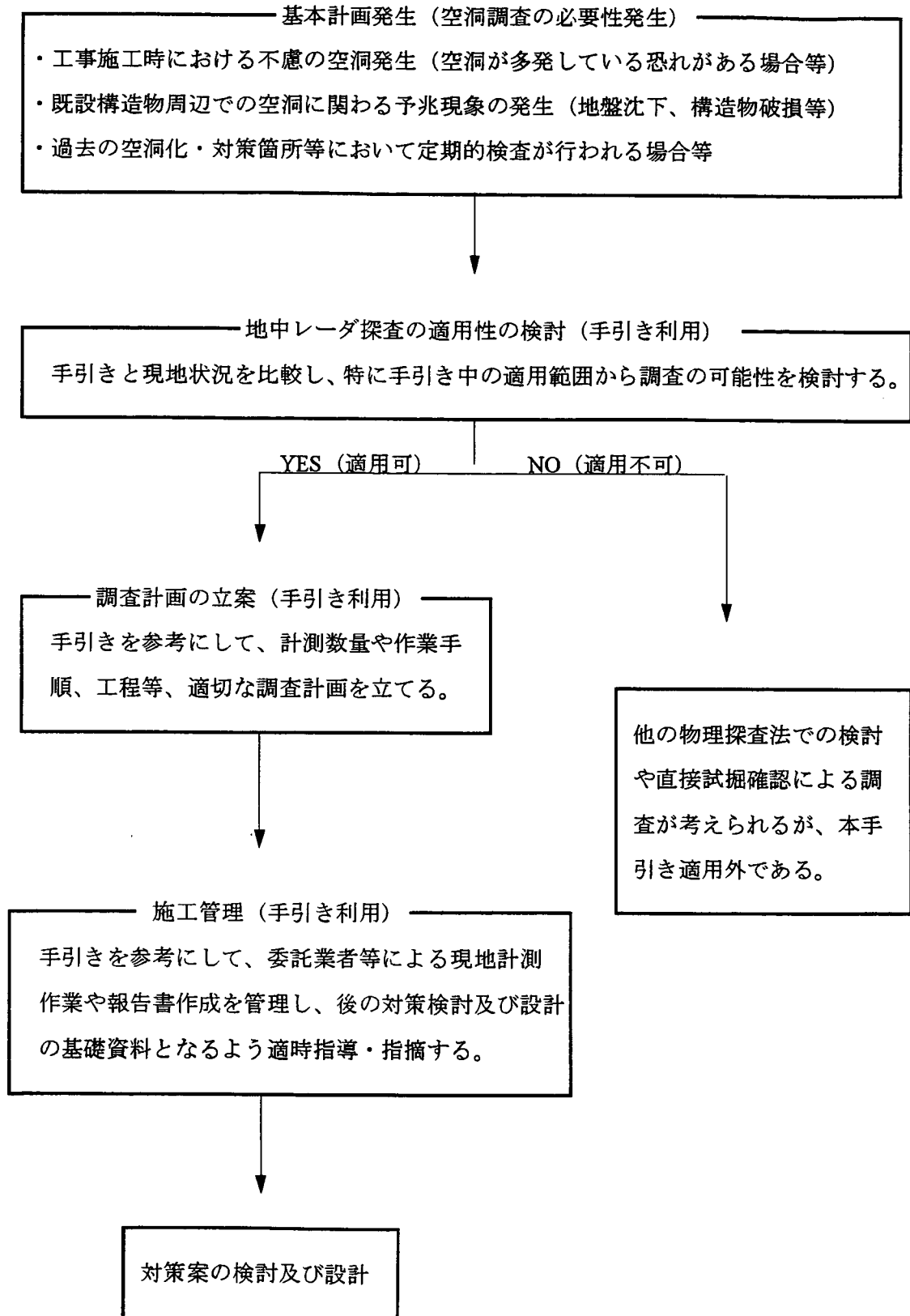
この手引きは、調査計画時及び施工管理時において利用及び活用することを目的とする。

##### (解説)

この手引きは適切な調査方法の選定や計画、施工管理の円滑化に寄与しようとするものであり、調査計画時及び施工管理時に使用することを目的とする。

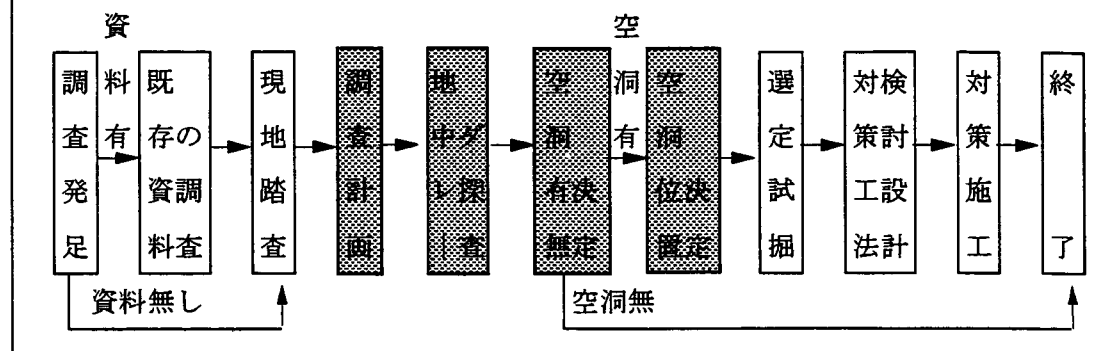
手引きの位置付けは、工事施工時での不慮の空洞発見や、既設構造物周辺での空洞に関わる予兆現象の発生時、定期検査時等、空洞調査が必要とされた時の参考資料として存在するものであり、以下のフロー図にその概略を示す。

## 手引利用についてのフローチャート



## 1. 5 地中レーダ探査の位置付け

地中レーダ探査は、空洞調査の必要性が生じた時点から調査計画、対策工事に至る過程の中で効率的に空洞の有無や位置情報を得るための調査手段として位置付ける。



### (解説)

地中レーダ探査の作業は機動性に優れており、試掘や他の物理探査の作業と比べ効率良く作業ができる。しかし、地中レーダ探査は間接的な調査方法であるため、代表的な空洞反応が得られた箇所において試掘確認を実施することが望ましい。

従って空洞調査の必要性が生じた時点から、地中レーダ探査、対策設計及び工事施工の過程は流れ図に示したようになり、この内の地中レーダ探査の位置付け（手引きの活用範囲）は網掛け指定した範囲となる。

以上のような流れで地中レーダ探査から得られる空洞情報を対策設計等に活用しようとするものである。

## 1. 6 地中レーダ探査の概要

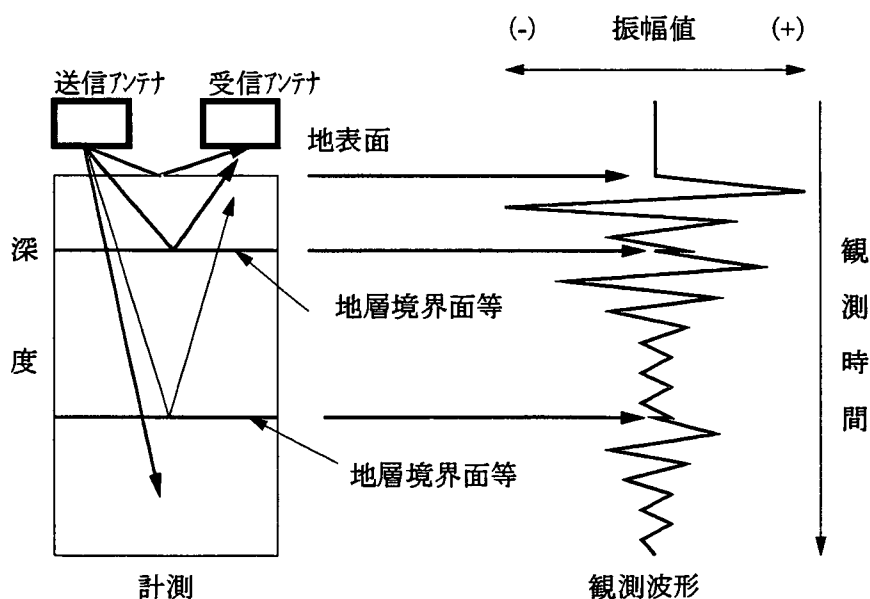
地中レーダ探査の基本的な計測原理は、送信電磁波が地中伝搬する際に物性境界面で発生する反射波を観測することである。

測線沿いを連続的に探査することにより取得される反射波形の並びは、地中物性境界面の形状を表し、この結果を利用して地下状況を推定する探査方法である。

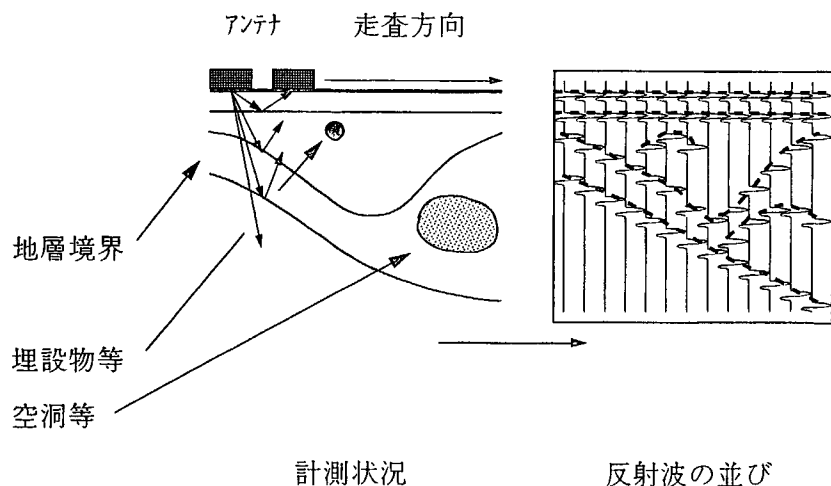
### (解説)

地表から地中に電磁波を送信すると、送信された電磁波は地中深く伝搬していく経緯の中で空洞や地層等の境界で反射減衰する。この時、発生した反射電波は、地表で観測でき、その深さは送信した時からの経過時間に依存する（探査概要図1）。

地中レーダ探査は、地表において上記した電波の送信受信を高速で行え、且つ装置を移動させながら連続して計測できる方法である。この結果、各点で求められた反射波の並び（反射面）を表した断面図から、反射面の形状や連続性を把握することができ、これらのことから地下状況を探ることが可能となる（探査概要図2）。



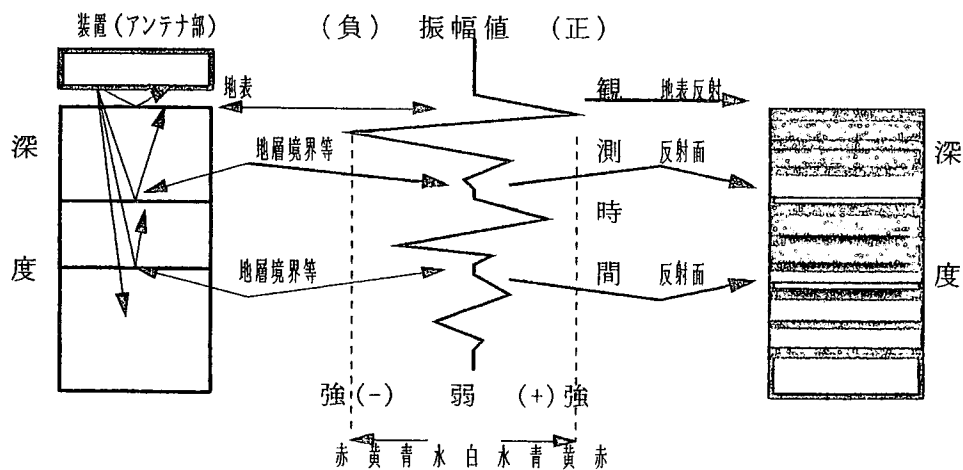
探査概要図 1



探查概要図 2

地中レーダ探査の結果は、反射波の並びを表す反射面断面図を以て空洞等の有無や位置等地下構造の推定が行われる。この時、反射断面図は各反射波の振幅値をカラー分割し、画像として表示される。

以下に観測波形とカラー画像の関係を示した。カラー分割の方法は振幅の正負に関わらず、振幅の絶対値の強弱に対してカラー分割した方法を参考例とした。



地盤（計測状況） 観測波形とカラー配色の関係 カラー画像

観測波形とカラー画像の関係

(地中レーダ探査の主原理)

次頁に示す図のように、地上にある送信アンテナから電磁波を発射し、これを地中に入射させる。入射された電磁波は地中に伝搬していくが、伝搬中に電氣的な特性（誘電率等）が異なる物体（図では空洞）が存在するとその境界面で反射を起こす。反射した電磁波は再び地中を伝搬して受信アンテナに戻る。この反射面を捉えて空洞等を探査するものである。

また、アンテナから送受信される電磁波は、指向性はあるがかなりの広がりをもっている。したがって、空洞を横断方向に測定した場合得られる断面像は、空洞の直上のみ反射波が現れるのではなく、図に示すように広がりをもった円弧状の信号となる。

このとき、円弧状に頂点にあたる反射波が真の空洞の位置を示す、それと入射波との時間差を測定することにより空洞天盤の深さが求められる。

空洞の深さDは

$$D(m) = V(m/s) \times T(s) / 2$$

V(m/s) : 電磁波の地中伝搬速度

T(s) : 入射波と反射波の時間差

$$V(m/s) = \frac{C(m/s)}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

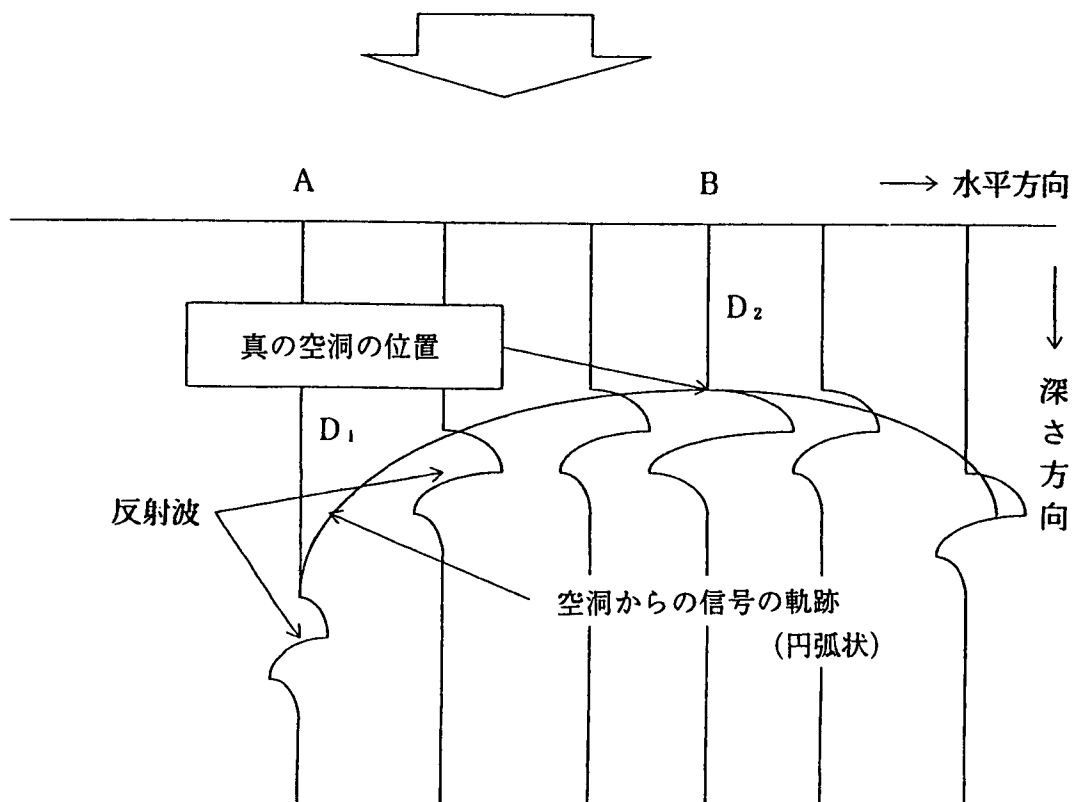
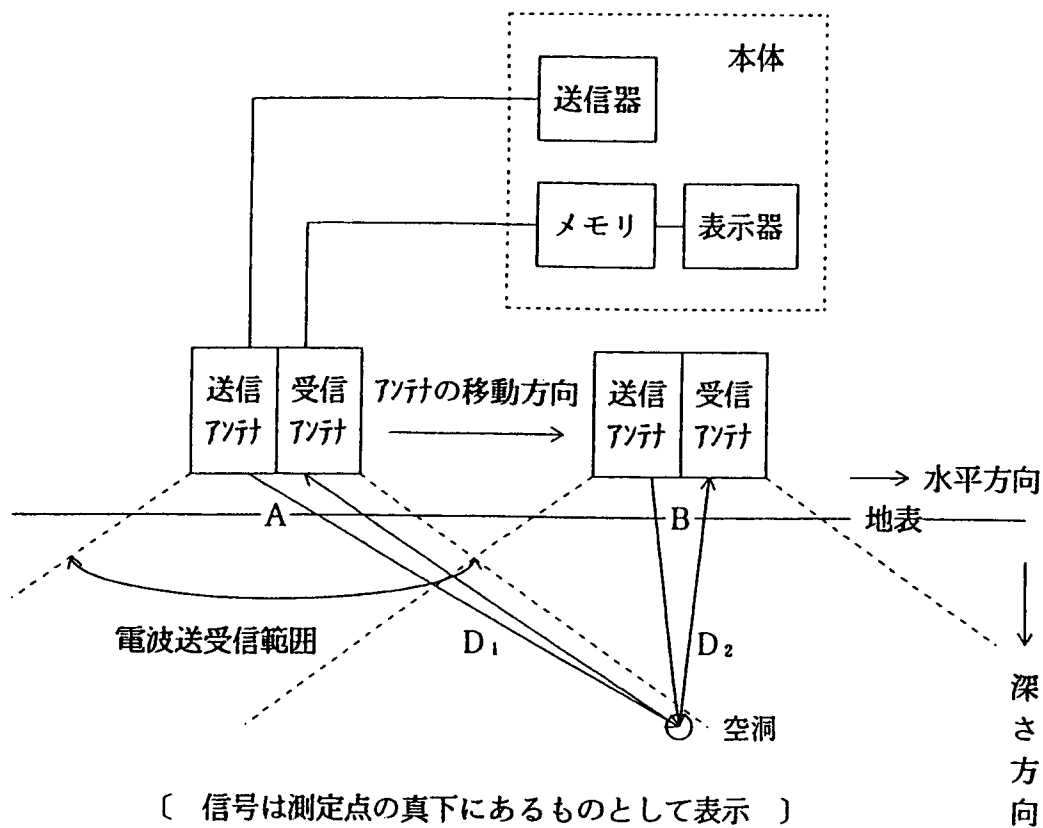
C(m/s) : 電磁波の空中伝搬速度

$\epsilon_r$  : 土の比誘電率

下表に地中レーダ探査における代表的媒体の比誘電率を示した。電磁波を利用した物理探査において、比誘電率は媒体の特性を表す代表的物性値である。上式から解るとおり、比誘電率の違いにより電磁波の伝搬速度は異なる。

地中レーダ探査における代表的媒体の比誘電率

| 区分  | 空気 | 氷 | コンクリート<br>岩 | 舗装＋土  | 未舗装<br>畑土 | 水  |
|-----|----|---|-------------|-------|-----------|----|
| 誘電率 | 1  | 3 | 6～9         | 11～21 | 24～40     | 81 |



参考資料：埋設管路非開削探查の手引き  
(埋設管路調査法研究会)

1. 7 地中レーダ装置の基本構成や特徴

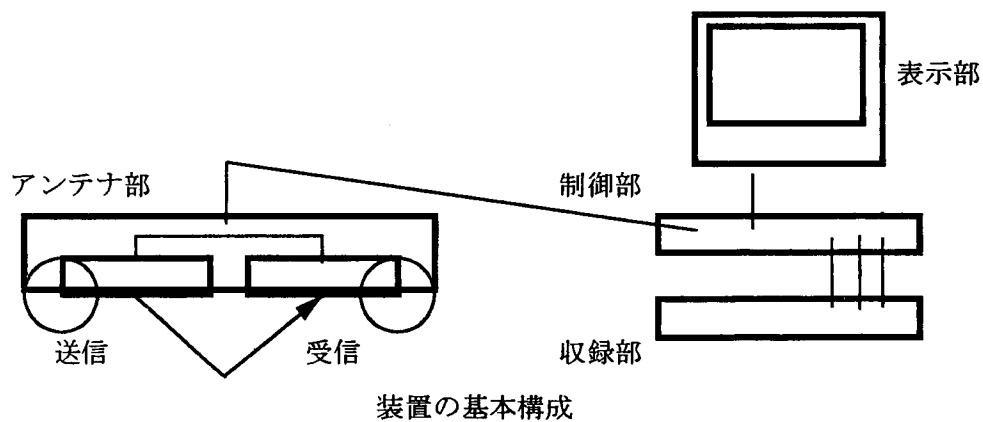
地中レーダ装置（以下「装置」と呼ぶ）はアンテナ部、制御部、収録部、表示部で構成され、各部はケーブルによって接続される。アンテナ部は送信および受信回路とアンテナで構成され、制御・収録・表示部は一体化したものもある。

（解説）

装置は、探査する対象物や深度に対して、アンテナ部を変更することによって対応する。一般的なアンテナは、送信する電磁波の周波数によって大きさが異なり、通常3～4タイプが用意されている（現在、小型タイプには送信周波数切り替え式もある）。

探査深度は送信周波数が低いほど大きく、送信周波数が高いほど探査深度は小さい。また探査できる空洞の規模は、送信周波数が低いほど大まかであり、送信周波数が高いほど細くなる。

一般的な構成図および概略システムは下図のとおりである。



下表に送信周波数と探査深度、探査対象物（空洞）の規模の関係を示した。

| 送信周波数と探査の特徴 |              |               |
|-------------|--------------|---------------|
| 送信周波数       | 低（約 100MHz）  | 高（1000MHz）    |
| 可探深度        | 大（3 ～ 4m）    | 小（50cm ～ 1m）  |
| 空洞規模        | 大（20 ～ 30cm） | 小（約 5 ～ 10cm） |

使用装置の選択には特にアンテナの周波数に注意する必要がある。以下に1. 2項で記述した各種構造物周辺の空洞探査に適切と考えられるアンテナの周波数を示す。

各種構造物周辺の空洞探査において適切なアンテナ周波数

| 各種構造物              | 使用アンテナの周波数(MHz)                                                           |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| R C及びコンクリート床版裏空洞探査 | 500 ～ 1000                                                                |
| 下水道管下空洞探査          | 700 以上                                                                    |
| トンネル覆工背面空洞探査       | 500 ～ 1000<br><br>500MHz 以下の装置も適用可能である<br>が大型となるため、特別探査深度が必要<br>な場合に限られる。 |

## 2. 探査編

### 2. 1 R C構造物周辺空洞探査（樋門・樋管、ボックスカルバート、踏掛け版）

#### 2. 1. 1 適用範囲

樋門・樋管やボックスカルバート、踏み掛け版はR C構造物であるため、探査の適用範囲は床版の配筋状況や厚み、地盤条件によって決定される。

（本適用範囲は土木研究所検証実験および既往事例から判断したものであり、全て二重配筋のR C構造物を対象としている）。

適用範囲（鉄筋径 16mm を対象）

| 鉄筋間隔等配筋状況                   | 適用 | 床版厚み                   | 探査深度                          |
|-----------------------------|----|------------------------|-------------------------------|
| 15cm × 15cm 以上<br>(ダブル配筋時)  | ○  | 60cm 以下<br>(左記配筋条件時)   | 1.0 ～ 2m (地盤による)<br>(左記配筋条件時) |
| 12.5cm × 12.5cm<br>(ダブル配筋時) | △  | 専門技術者と相談要<br>(左記配筋条件時) | 専門技術者と相談必要<br>(左記配筋条件時)       |
| 10cm × 10cm 以下<br>(ダブル配筋時)  | ×  | —                      | —                             |

| 地盤条件                 | 適用 | 探査深度                      |
|----------------------|----|---------------------------|
| 砂質土                  | ○  | 1.5 ～ 2.0m                |
| 粘性土                  | ○  | 1.0 ～ 1.5m                |
| 河口近隣地盤<br>(海水・汽水影響域) | △  | 専門技術者と相談必要<br>(地下水導電率による) |

#### （解説）

樋門・樋管やボックスカルバート、踏み掛け版はR C構造物であるため、地中レーダ法の探査能力には鉄筋が大きく影響する。これは地中レーダ法が使用する電磁波が金属物に強く反射減衰することからきている。

鉄板等のメッシュ状ではない金属物を透過させることは将来的に考えても不可能であり、R C床版の鉄筋間隔が広いほど探査能力は高く、狭いほど探査能力は低い。また、R C床版が薄いほど探査能力は高く、厚いほど探査能力は低い。これらのことを踏まえ、検証実験や過去の既往資料から判断した探査の適用範囲や適用限界は上表のとおりである。

## 2. 1. 2 装置（アンテナ）の選定

アンテナの選定は、アンテナの大きさと周波数特性に注意し、送信周波数500～1000MHz用に製作された小型アンテナを用意し、現地テストにより適性タイプを使用することが有効である。

### （解説）

鉄筋間隔が狭いものほど高い送信周波数を使用し、広いほど低い送信周波数を使用することが望ましい。また探査できる床版の厚みは送信周波数が低いほど厚くなり、高いほど薄くなる。このように狭い鉄筋間隔に有効な送信周波数と厚い床版厚に有効な送信周波数は逆の傾向を示すこととなる。鉄筋間隔が10cm～12.5cmの二重配筋の場合や60cm以上の厚みを持つ床版に対しては特にアンテナの選定に注意を要する。

このような探査は事前からアンテナの送信周波数を決定して探査を実施することは危険であるため、あらかじめ送信周波数別のアンテナをいくつか用意して探査にのぞみ、事前テストを実施した上で適切な送信周波数のアンテナを選定することが重要である。現状で有効と考えられるアンテナは、送信周波数500MHz、700MHz、1000MHzの3タイプ程度が考えられる。

本探査は地中レーダを用いた空洞探査の中で、最近になって可能と認められた特殊探査であるため、適切な周波数等の判断を下す人間には専門技術者あるいは熟練作業員を必要とする。

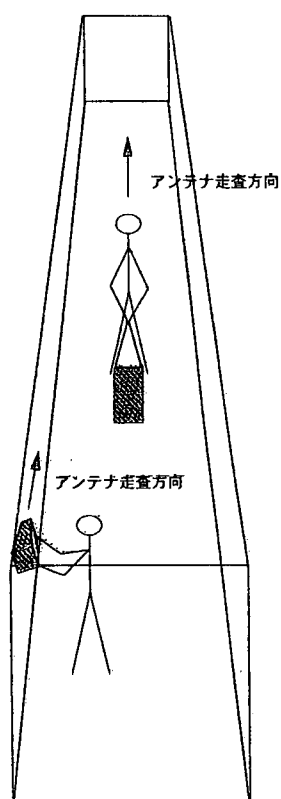
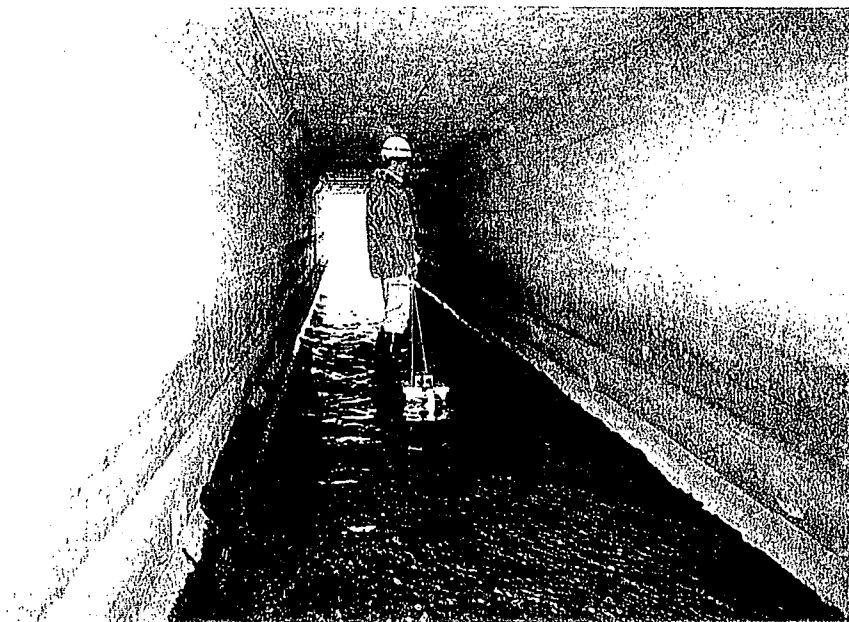
## 2. 1. 3 探査の方法

構造物周辺の空洞を探査する方法は、対象となる地盤を被覆するRC床版表面に装置（アンテナ部）を設置し、表面沿いを移動計測（以下「走査」という）するものである。

樋門・樋管やボックスカルバートの場合、構造物の中の底版や天版等の各内壁沿い走査し、踏掛け版等の敷設物の場合、地表面沿いを走査して、背面地盤の空洞を探査する。

### （解説）

次頁に探査風景および探査方法の概略図を示す。



以下に RC ボックスカルバート下に発砲スチロール（以下「EPS」と呼ぶ）を埋め立て、  
 この検出実験を実施した結果を示す。

実験モデル（RC ボックスカルバート）

RC ボックスカルバート①  
 (RC スペック 15 × 15cmW)

RC ボックスカルバート②  
 (RC スペック 10 × 10cmW)

レーダーアンテナ

ボックス

RC 底版

0

15

35

85 (cm)

基礎コンクリート

空洞 (EPS)

2m

基礎地盤 (粘性土)

生画像

0.0

0.35

深度 (m)

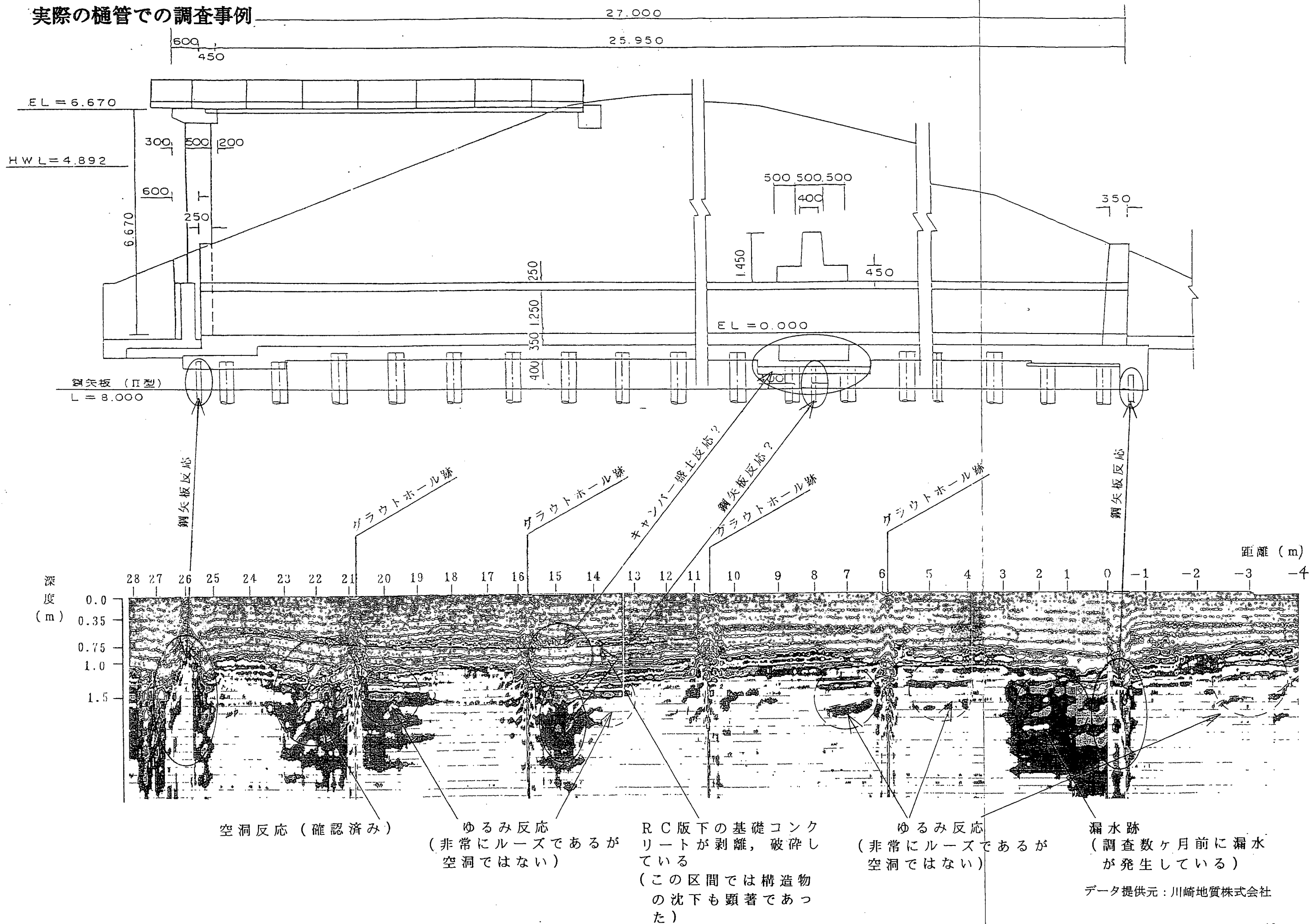
波形処理結果

0.0

0.35

深度 (m)

# 実際の樋管での調査事例



## 2. 2 下水道管周辺空洞探査（ヒューム管等埋設管）

### 2. 2. 1 適用範囲

塩化ビニル管や陶管、無筋ヒューム管は材質上の問題は無く、らせん鋼筋を有するヒューム管には注意が必要とされる。注意事項はらせん鋼筋の間隔であり、下表にその適用範囲を示した。

探査は管内に装置を挿入するため管内径 400mm 以上が望ましく、管内水は締め切り排除する必要がある。

適用範囲（1000MHz アンテナ使用時）

（本適用範囲は土木研究所検証実験から判断したものである）。

| らせん鉄筋間隔     | 適用 | 管内径                                          | 探査深度                                    | 探査条件              |
|-------------|----|----------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|
| 間隔 6.5cm 以上 | ○  | 400mm 以上<br>(400mm 以下の場合<br>は専門技術者と相談<br>必要) | 0.5 ～ 1.0m<br>(砂質土)<br>0.5m 程度<br>(粘性土) | 締め切りおよび管内水を排除すること |
| 間隔 3.5cm    | ×  | —                                            | —                                       | —                 |

#### （解説）

本探査の使用目的は地下埋設物が複合したり、土被りが厚く地表からの探査が難しいの場合に実施する。主な探査対象は推進工法等の非開削工法によって埋設された有筋ヒューム管が考えられるため、深度 1 m 以上の探査は難しく、管下極近傍の空洞が検出対象となる。

R C 構造物と同様に金属製の配筋材が強く悪影響する探査である。有筋ヒューム管の配筋状況は 6.5cm 程度もしくは 3.5cm 程度の間隔でらせん状に配筋されている。6.5cm 程度の間隔でらせん配筋されたものの使用率が大半を占め、これについては探査可能である。使用率は低いが、3.5cm 間隔のものを探査することは現状装置の能力では難しいため、探査の計画時に注意する必要がある。

塩化ビニル管や陶管は材質上の問題は無く、また深度 1 m 以上の探査も可能と思われる。

## 2. 2. 2 装置（アンテナ）の選定

アンテナの選定は、アンテナの大きさと周波数特性に注意し、管内径を考慮して極力小型アンテナを使用する。

有筋ヒューム管に有効な送信周波数の範囲は700MHz以上である。現状の技術レベルから探査能力とアンテナの大きさの両面を考慮すると、送信周波数1000MHz程度のアンテナを選択することが有効である。

### （解説）

管内挿入と数cmのらせん筋の間隔を透過させることを考慮し、アンテナは高周波数型の小型装置（20cm 大程度）にする必要がある。土研検証実験により有効な送信周波数の範囲は700MHz以上であることがわかっており、探査能力を備えたアンテナの中で極力小型アンテナを選択する必要があり、現状では1000MHz程度の送信周波数のアンテナが有効である。

また、1000MHzよりも送信周波数の低いアンテナを使用することが不可能ということではなく、挿入する管径とアンテナ規模の管径に注意して使用すれば700MHz程度の送信周波数のアンテナでも探査は可能であり、探査できる深度は向上する。

## 2. 2. 3 探査の方法

本探査は、装置をマンホールからヒューム管内に挿入し、次のマンホールまでの間を探査する。探査対象は管直下の空洞とする。

アンテナは下方に向け、あらかじめ挿入したロープ等により、下水排水方向に向かって引張り走査するものである。

### （解説）

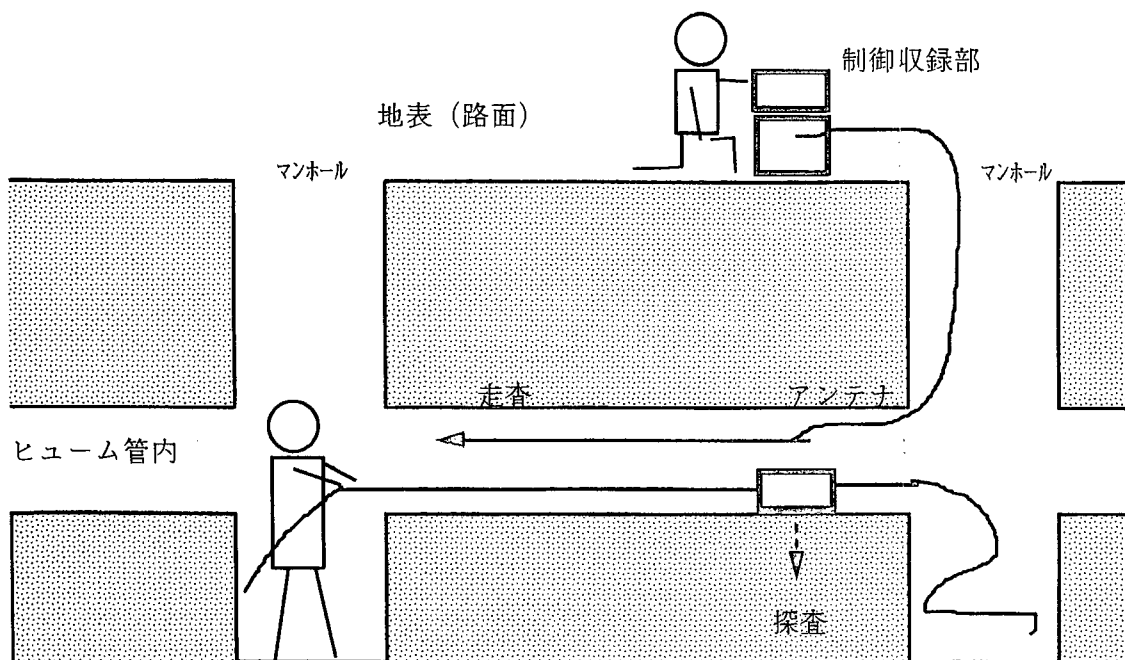
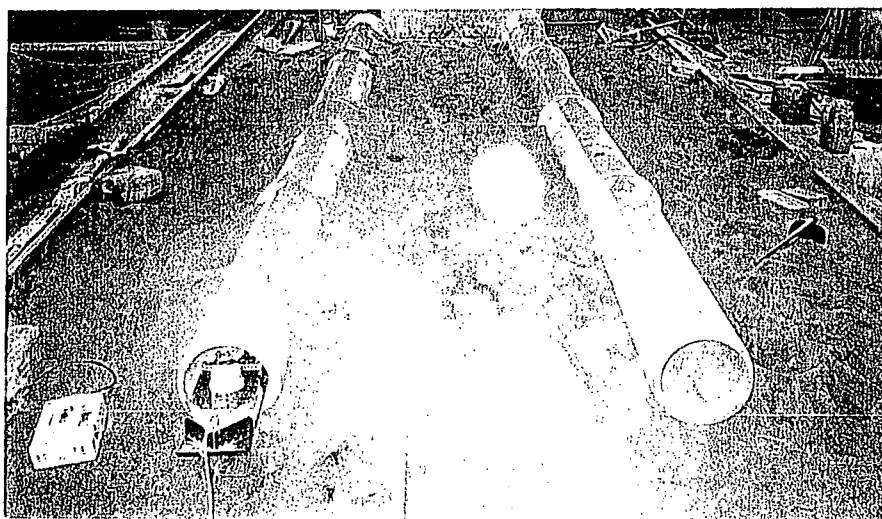
継ぎ足しロッド等による押し込み走査する方式か、あらかじめマンホール間を通したロープ等により引張り走査する方式のどちらかが選択できるが、押し込み方式では計測が断続的になるため、引張り方式が望ましい。引張り用ロープは、継ぎ足しロッド等により

あらかじめマンホール間を通しておく。挿入装置には後方に更に1本の命綱を配しておく。  
これは装置が走査途中で引っかった場合の対処策である。

ヒューム管は定間隔でジョイントされているため、継ぎ手部には段差を持っている。一般に排水方向に向かい段落ちしていることが考えられるため、装置が引っかからないように排水方向に向かって走査しなければならない。

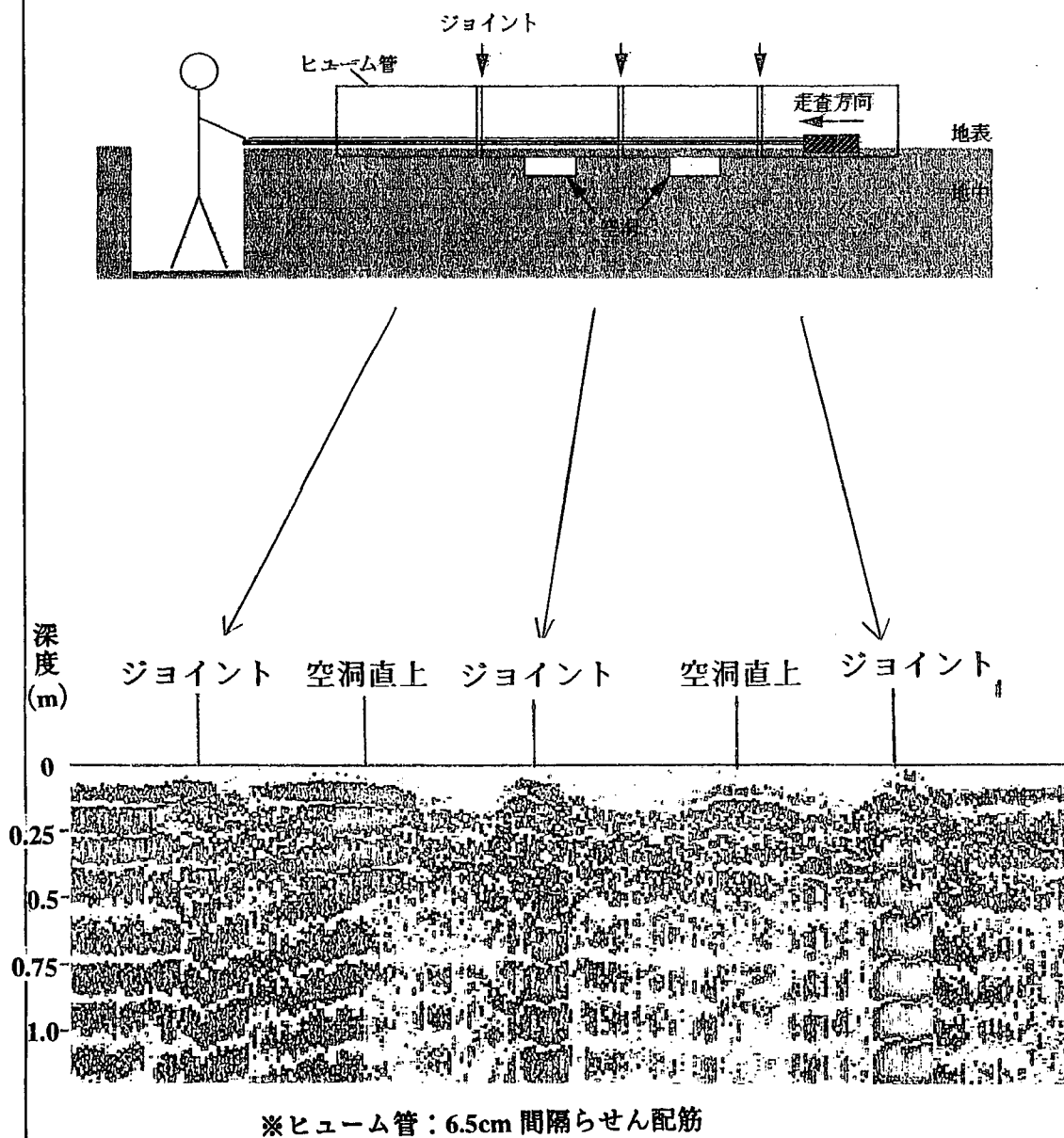
現状ではロボット等による自動化には至っていないが、ロボット化等専用装置の開発が有効になる探査であり、今後の検討が必要である。

以下に探査風景および探査方法の概略図を示す。



## 2. 2. 4 探査事例

以下にヒューム管下にEPSを埋め立て、これの検出実験を実施した結果を示す。



## 2. 3 トンネル覆工背面空洞探査（山岳トンネル、NATMトンネル）

### 2. 3. 1 適用範囲

本探査は在来工法による山岳トンネルやNATMトンネルの覆工コンクリート背面の空洞探査を指し、探査を適用する覆工コンクリートは無筋コンクリートとする。

覆工材がRCの場合は2. 1項で記述した内容に準拠するものと考えられるが、検証事例がないため、専門技術者に相談することが適切である。

シールドトンネルについては、特殊な場合を除き（生コン巻き）探査不可能である。

#### 適用条件

| トンネル工法   | 覆工材量     | 適用性        | 探査の支障    | 探査深度        |
|----------|----------|------------|----------|-------------|
| 山岳トンネル   | 無筋コンクリート | ○          | 支保工箇所    | 1～2m(地盤による) |
|          | RC       | 専門技術者と相談要  | 支保工箇所    | ？           |
| NATMトンネル | 無筋コンクリート | ○          | ロックボルト箇所 | 1～2m(地盤による) |
| シールドトンネル | 各種セグメント  | ×          | —        | —           |
|          |          | (生コン巻のみ可能) |          |             |

#### (解説)

トンネル覆工背面の空洞探査は調査事例も多く、構造物周辺の探査としては比較的古くから着手されている。これは覆工材が無筋コンクリート巻きであるケースが多く、またトンネル形状や立地環境から空洞が出来やすい状況にあることも加味される。

覆工材にRCが使用されている場合にはほとんど調査事例が無く、検証資料が不足している。ただし、2. 1項のRC構造物周辺探査の内容に準拠するものと予想されるため、探査は必ずしも不可能ではない。このことから、あらかじめ専門の技術者と相談することが適切である。

適用できるトンネルは山岳トンネルおよびNATMトンネルである。シールドトンネルについては、覆工材に生コンや無筋コンクリートセグメントが使用された特殊ケースを除き、大半が探査不可能である。

### 2. 3. 2 装置（アンテナ）の選定

アンテナは送信周波数 500～1000MHz の中で選定することが望ましい。  
過去の調査事例では、送信周波数 500 ないし 700MHz アンテナの使用事例が多く、良成果が取得されている。  
覆工材が RC である場合の使用装置は 2. 1 項の内容に準拠するものである。

#### （解説）

装置は以下の点に留意して選択される。

- ・ 探査方向がトンネル側方および上方が大半であり、機動性が高い小型軽量装置が必要であること。
- ・ 巻き厚材と基礎地盤の境界付近～1 m 深程度の浅部情報が重視されるため、比較的高い検知能力を持つ装置を使用した探査が有効であること。

以上の点から送信周波数 500MHz 以上のアンテナが選定し、浅部探査を重視することが有効である。特に送信周波数 500 ないし 700MHz の使用事例が多く、良成果が取得されている。

送信周波数 500MHz 以下のアンテナは必ずしも適用不可能ではなく、探査深度が増大する利点がある。ただし、検知能力や機動性が劣るため、特に探査深度が必要とされる場合にのみ浅部探査と併用することが有効であろう。

### 2. 3. 3 探査の方法

本探査はトンネル覆工面全体を探査範囲とする必要があり、天盤等高所での安全且つ効率的な計測方法が有効である。このため人間の背丈範囲での調査を除き、高所作業車等特殊車両を利用した探査を有効である。

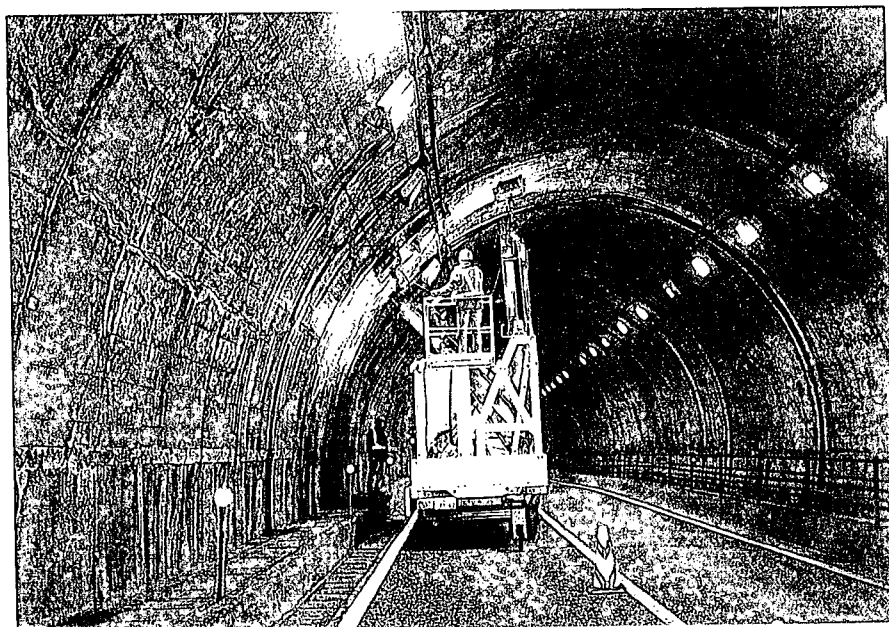
#### （解説）

本探査は、トンネルの覆工裏を全面的に探査する場合が多く、天盤等高所作業が必要な

ることがある。この場合、高所作業車等や特殊車両を利用した探査が有効であり、探査計画時に考慮しておく必要がある。ただし、人間の背丈程度のトンネル側方探査の場合は人為による探査が可能であり、安全面への配慮以外に特に注意事項は無い。

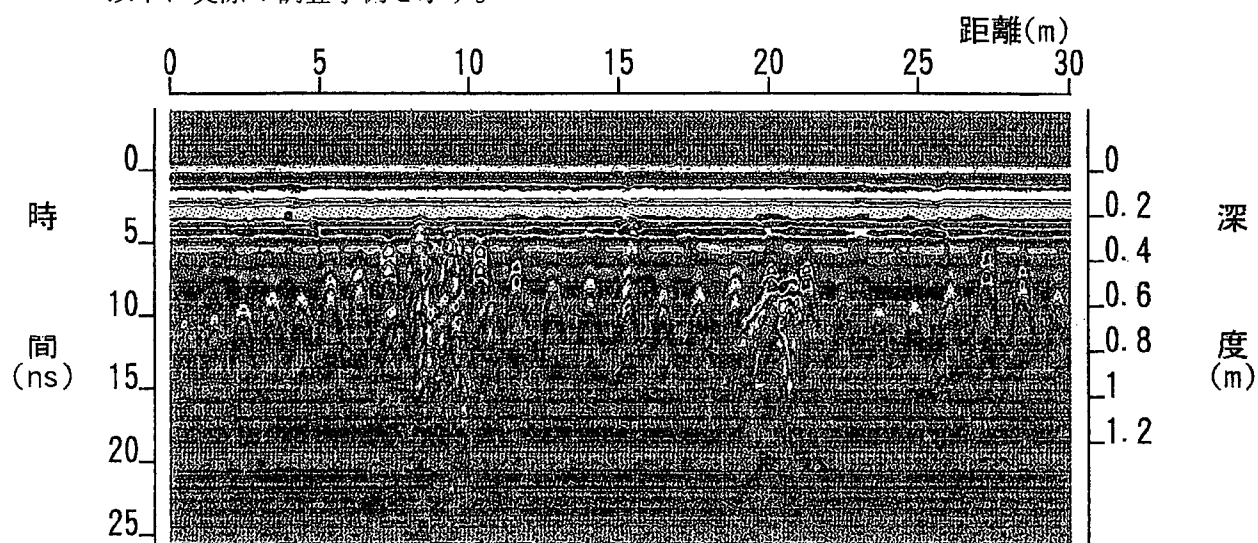
現在、探査専用開発された特殊車両が各企業で開発されている。これらには、柔軟に稼働するブームにアンテナが取り付けられているものもあり、効率化に向けたシステム開発が盛んに実施されている。

以下に探査風景および探査方法の概略図を示す。

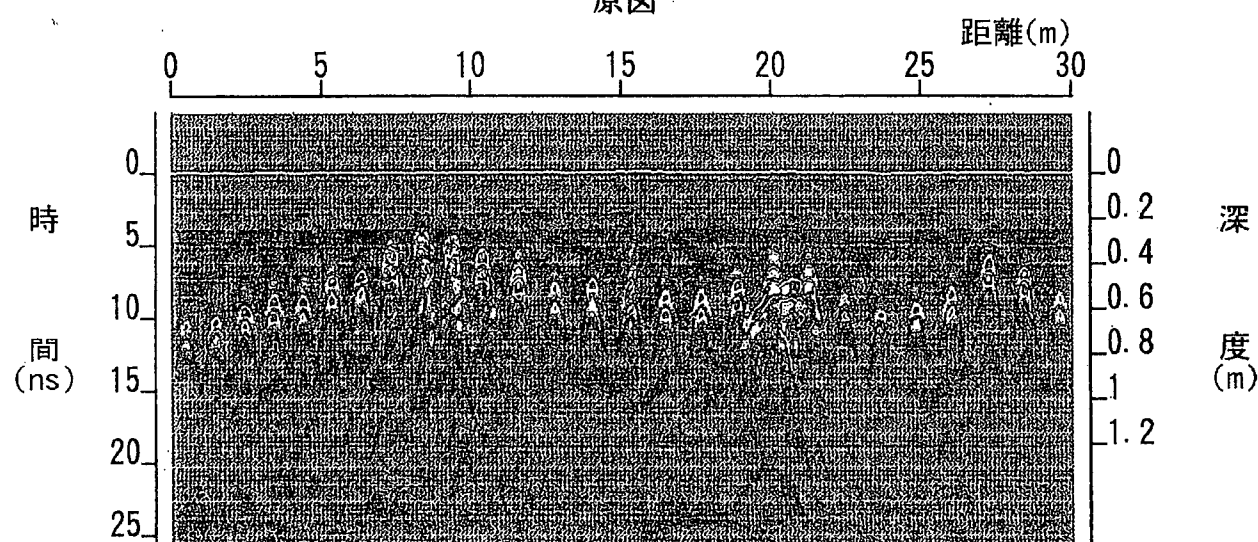


## 2. 3. 4 探査事例

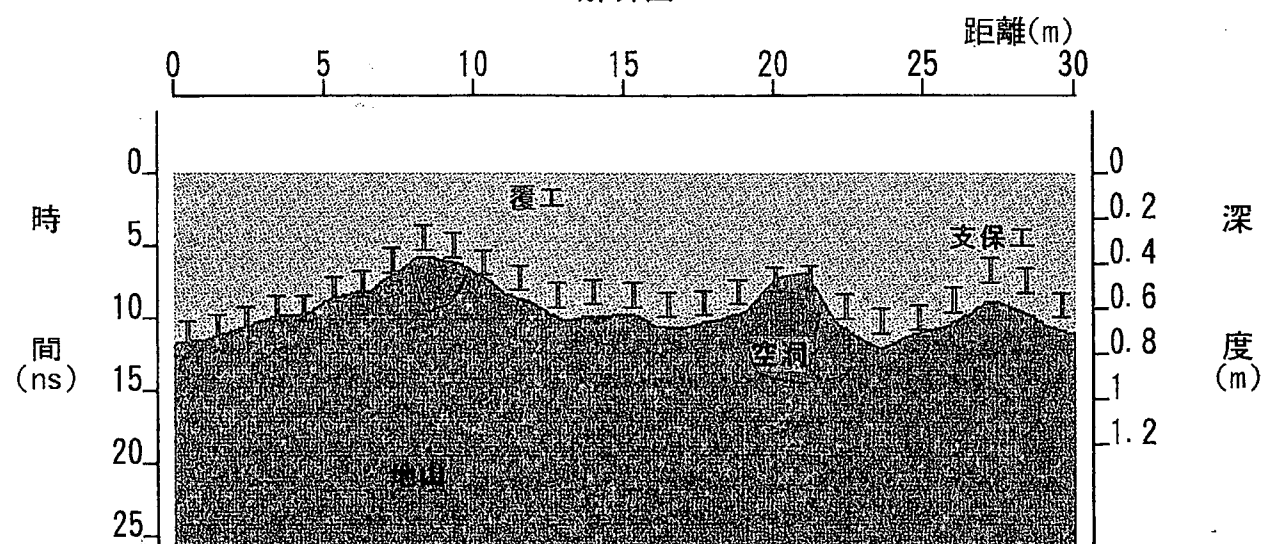
以下に実際の調査事例を示す。



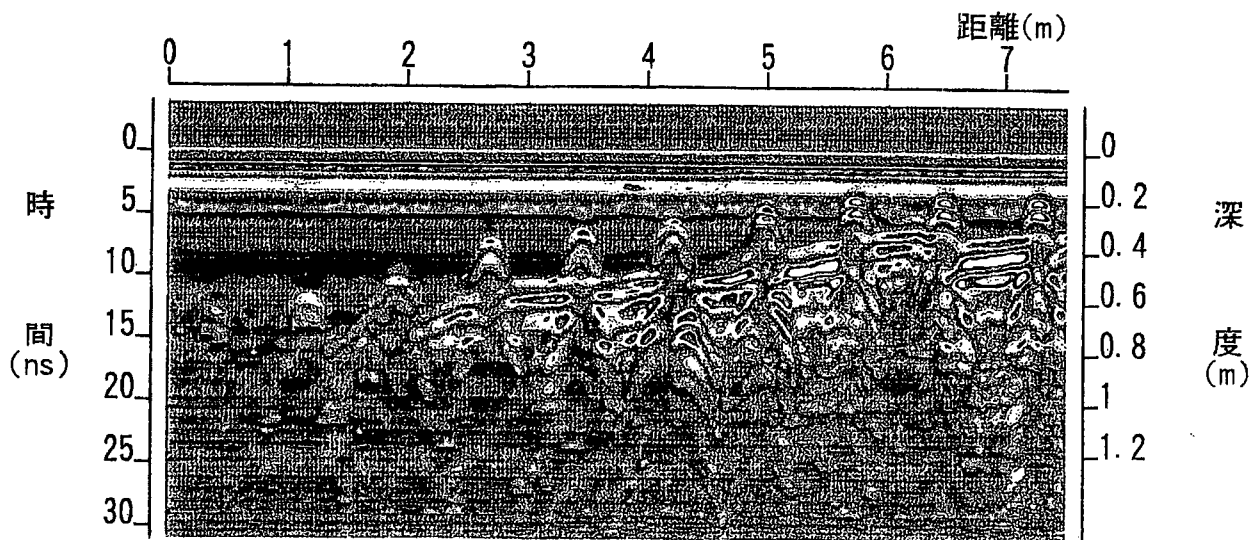
原図



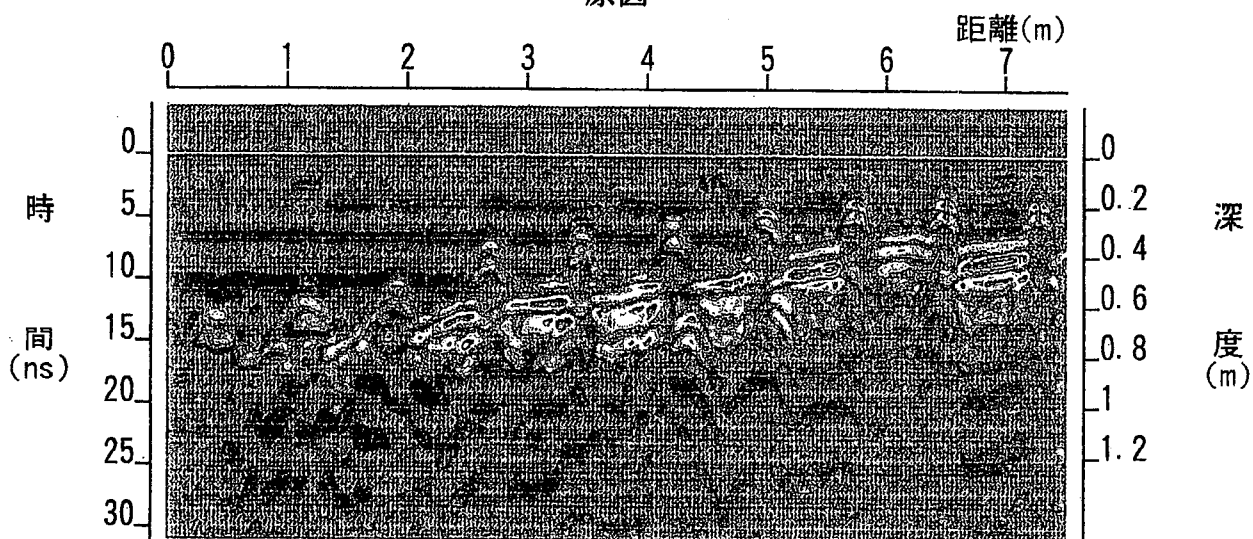
解析図



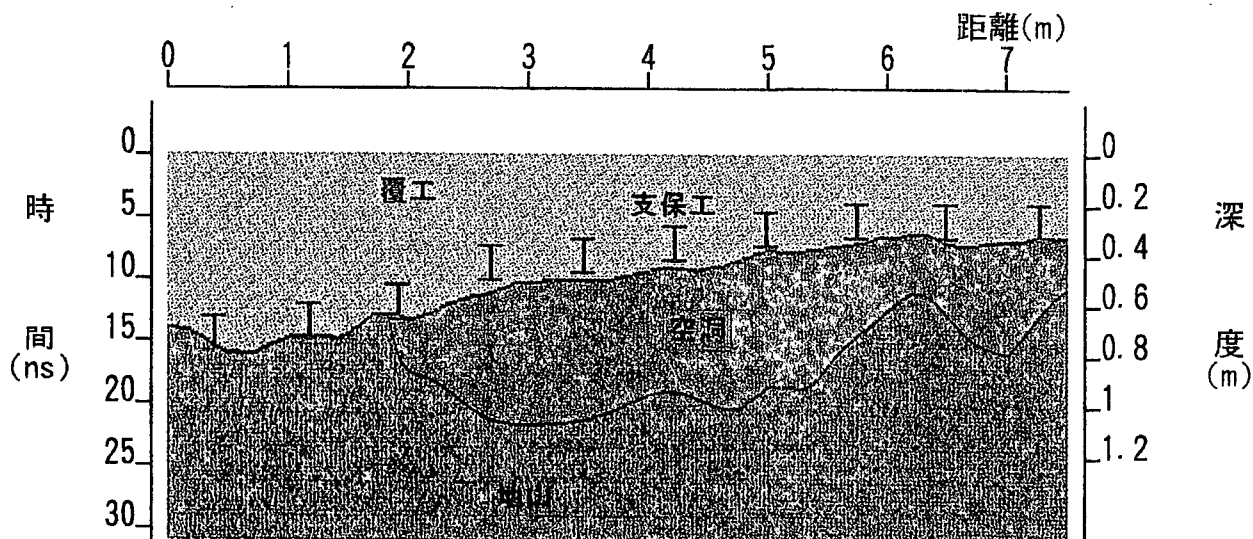
上から測定記録、データ処理記録、解析断面図



原図



解析図



データ提供元：応用地質株式会社

上から測定記録、データ処理記録、解析断面図

### 3. 解析編

ＲＣ構造物やヒューム管下空洞探査では、取得されたデータに対し波形解析処理を実施し、空洞反応を鮮明化することが重要である。

#### （解説）

ＲＣ構造物や有筋ヒューム管の場合、部材に鉄筋を有するため、取得データに鉄筋の影響が強く混入する。このため、これらを出来る限り除去し、空洞の反応を鮮明化させることが重要となる。

以下に空洞の鮮明化に有効と考えられる代表的な波形解析方法を説明する。またこれらに関しては、ＲＣ構造物やヒューム管のみならず、地中レーダ法による空洞探査の全般の解析に対して有効である。

#### 1) 差分処理

ある範囲の波形全てを加算平均し、その範囲の最も平均的傾向を示す平均化波形を作成する。これを各波形から差分することにより、小範囲特有に現れた反射波を抽出する。

空洞反応は小範囲に現れる反応の代表例であり、空洞反応の鮮明化には最も有効である。

#### 2) フィルター処理

必要帯域以外の周波数成分を除去する。

抽出したい反応の周波数性が明確に異なる場合に有効な処理である。

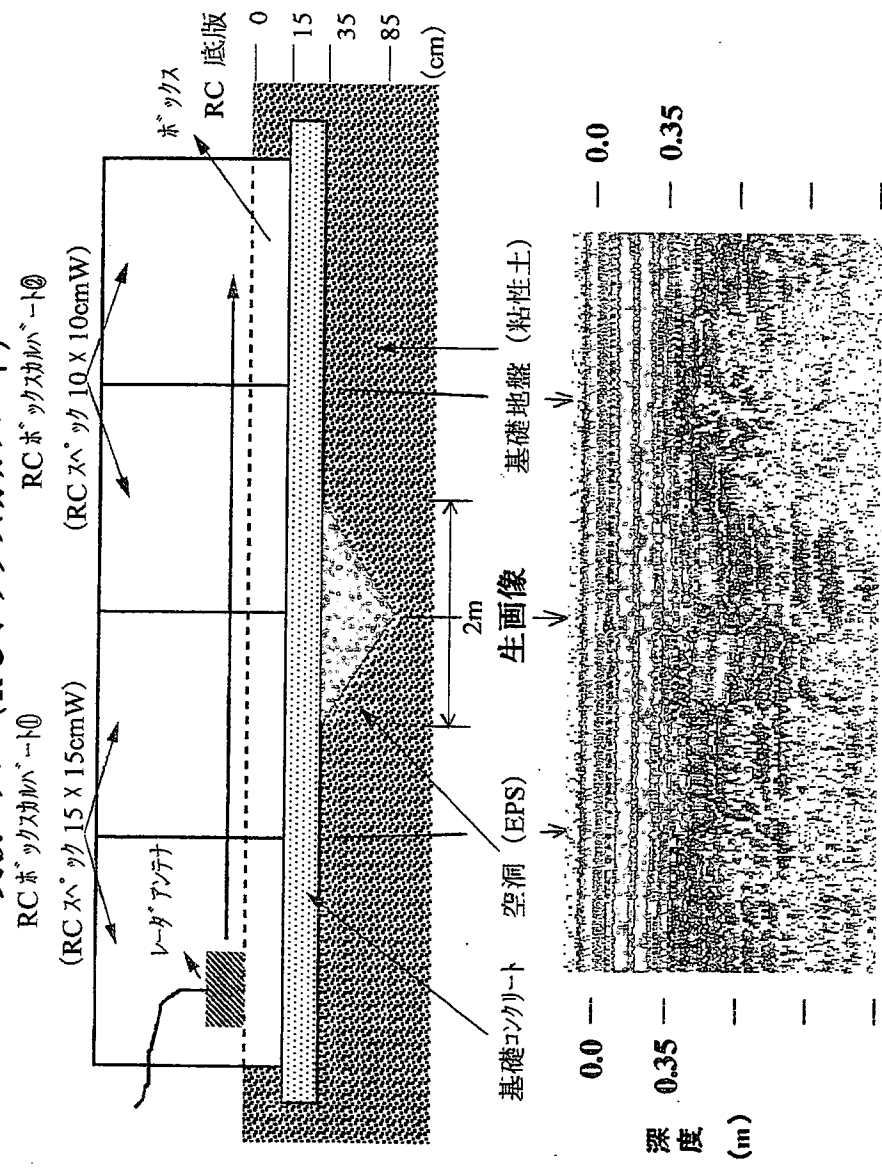
#### 3) デコンボリューション処理

記録波形を時間幅の短いパルス波形に圧縮する。

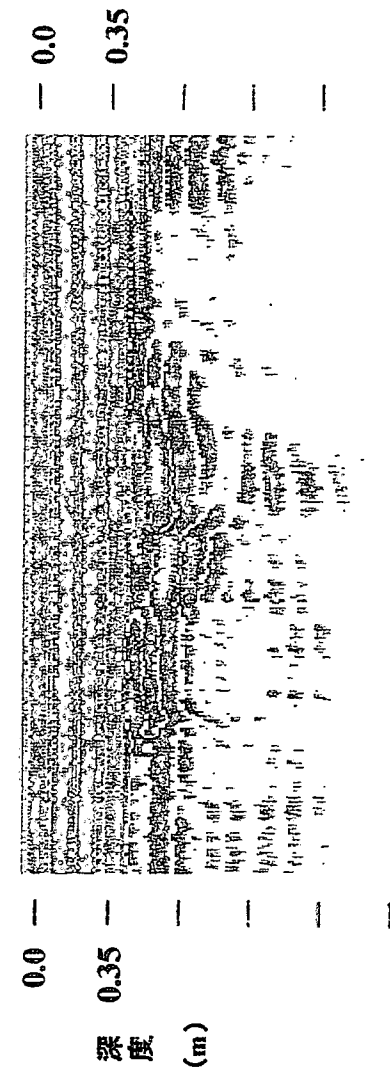
各トレースに共通する基本波形を抽出し、基本波形をパルス波に変換する逆フィルターを作成し、この逆フィルターと各トレースをコンボリューションすることによって反射系数列の抽出を行う。

この結果、反射波はより繊細且つ強調されることとなり、抽出したい反応がより明瞭となる場合がある。

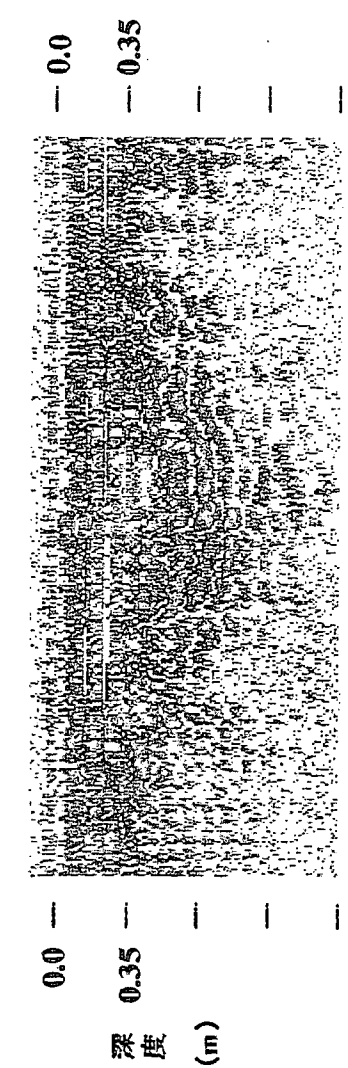
実験モデル (RCボックスカルバート)



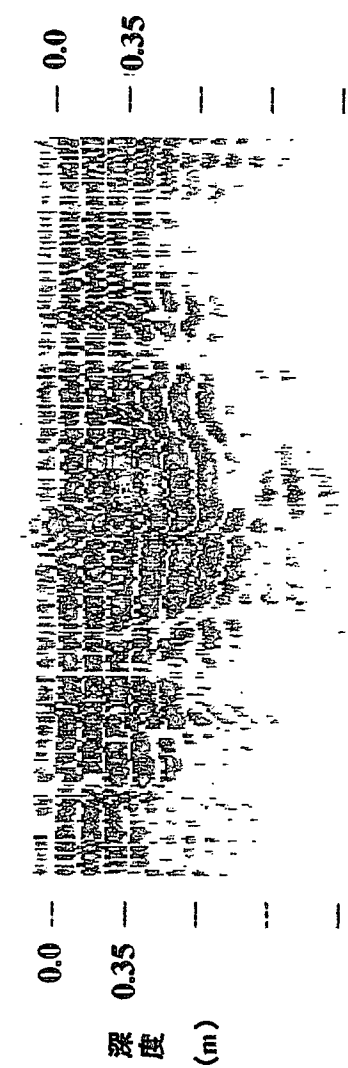
フィルター処理結果



差分処理結果



総合処理結果 (フィルター、差分)

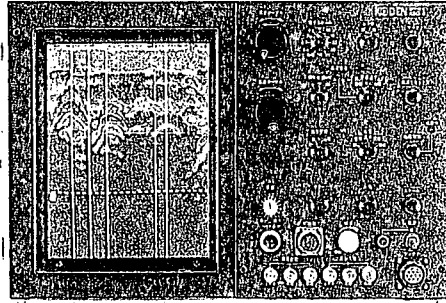


#### 4. 探査装置

本手引きに關係する地中レーダ装置を紹介する。

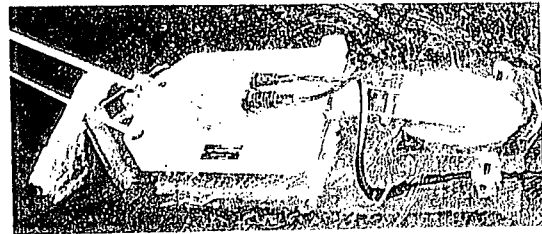
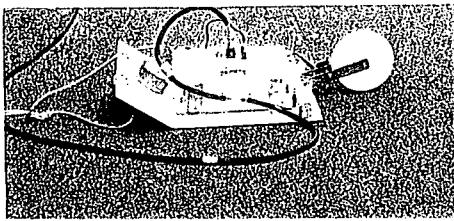
##### 装置①

##### 制御収録装置



500 ~ 1000MHz 切替式アンテナ

500 ~ 1000MHz 切替式アンテナ (防水型)

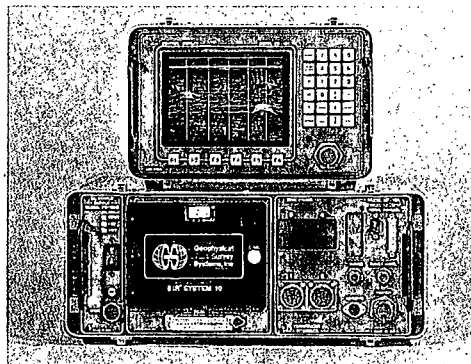


##### 装置①主仕様

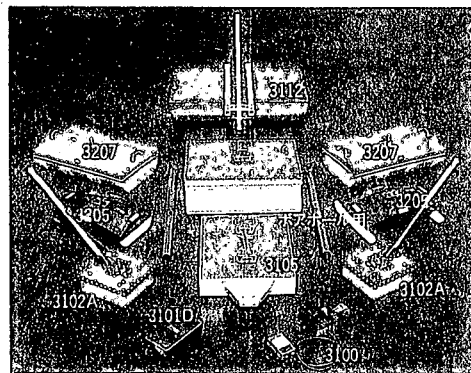
- ・ 電源 AC100V
- ・ 測定レンジ 35, 75, 150, 200nsec
- ・ 収録 DAT、ハードディスク、光磁気ディスク
- ・ ADサンプリング 各測定レンジにおいて1024サンプル
- ・ アンテナ周波数 500~1000MHz (4段階切替式、防水型有り)  
(他に150MHz、350MHzアンテナ有り)
- ・ 用途 RC構造物背面、コンクリート背面空洞調査  
ヒューム管下空洞調査  
トンネル覆工厚および背面空洞調査  
その他空洞、埋設物調査

資料提供元：地中レーダ探査装置パンフレット(株式会社光電製作所)

装置②  
制御収録装置



各周波数別アンテナ



装置②主仕様

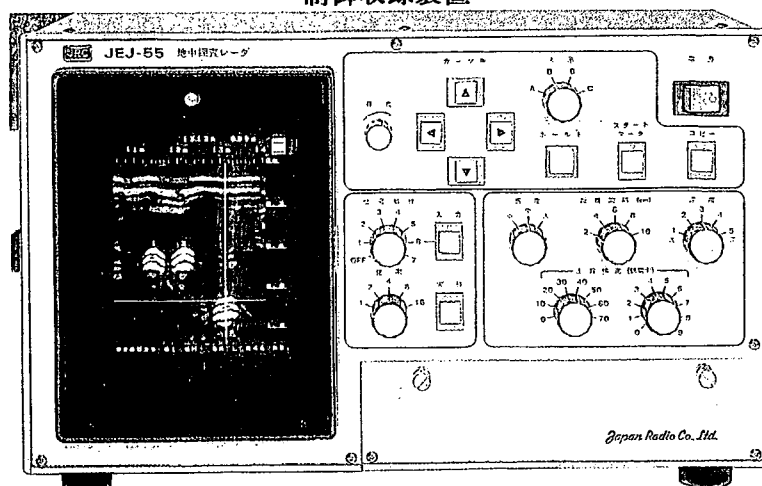
- ・電源 DC12V、AC115/230V
- ・測定レンジ 0～10、000nsec
- ・収録 8mmテープ、フロッピーディスク
- ・ADサンプリング 128, 256, 512, 1024サンプル
- ・アンテナ周波数  
および用途

| アンテナ (Model) | 周波数 (MHz) | 主な用途        |
|--------------|-----------|-------------|
| 3112         | 80        | 地盤構造探査      |
| 3207         | 100       | 地盤構造探査      |
| 3105         | 300       | 空洞・埋設物探査    |
| 3205         | 300       | 空洞・埋設物探査    |
| 3102A        | 500       | 空洞・埋設物探査    |
| 3101D        | 900       | トンネル覆工厚さ測定  |
| 3100         | 1000      | コンクリート内鉄筋探査 |

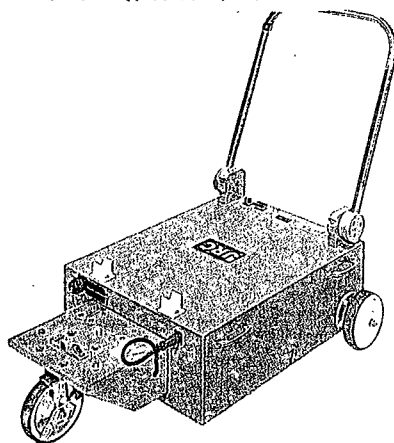
資料提供元：GSSI 地下レーダ装置パンフレット(応用地質株式会社)

### 装置③

#### 制御収録装置



#### アンテナ (代表種、中型アンテナ)



#### 装置③主仕様

- ・電源 AC100V
- ・測定レンジ 0～20、40、60、100、200nsec
- ・収録 各種データレコーダ、内部記憶 (60m/4cm)
- ・各種アンテナ 大型アンテナ 探査深度 2m以上
- による探査深度 中型アンテナ 探査深度 0.5～2m
- 小型アンテナ 探査深度 0.15～1m
- ・用途 トンネル覆工厚および背面空洞調査
- コンクリート背面空洞調査
- その他空洞、埋設物調査

資料提供元：地中レーダ装置パンフレット(日本無線株式会社)