

## 11. 地山探査レーダ(ボイドシーカ)の開発

(株)小松製作所： 坂西 昇一・片山 幸教・金光 保雄  
市村 泰彦・阿部 友行・岡本 晃

### 1. はじめに

都市部における下水道、通信ケーブル、送配電ケーブルの敷設、地下鉄工事には、シールド機械が多く用いられるが、切羽面を目視できない密閉型シールド機械においては、切羽面を安定させながら掘削すること、また、地山の緩みや、崩落による空洞をいち早く検知し然るべき処置をすることが課題であった。

そこで、シールド機械近傍0～30 [cm]の地山の状態をリアルタイムに検知する地山探査レーダ=ボイドシーカを開発した。本稿では、開発したボイドシーカの構成、信号処理方法と、名古屋地下鉄椿町工区における実験結果について報告する。

### 2. 装置の構成

本装置は、電磁波を放射すると、電気的特性(誘電率、導電率)の異なった物質の境界面で反射波を生ずるというレーダの原理を応用したものである。電磁波を地山に放射し、その反射波を計測することで、空洞などの有無、大きさを検知する。

本装置は、アンテナ、コントローラ、演算処理装置の3つの部分で構成されている。本装置の構成図を図-1に、アンテナとコントローラの外観を図-2に示す。

#### 1) アンテナ部

アンテナは、シールド機械のスキンプレートに取り付けられて、地山に対して電磁波を放射して、反射波を受信する。

送信アンテナと受信アンテナを同一のボックスにコンパクトに配置することで、シールド機械にあける穴の面積が、小さくなるようにした。また、アンテナを保護するブレードの材料は、耐摩耗性、電気的特性を考慮して選定した。

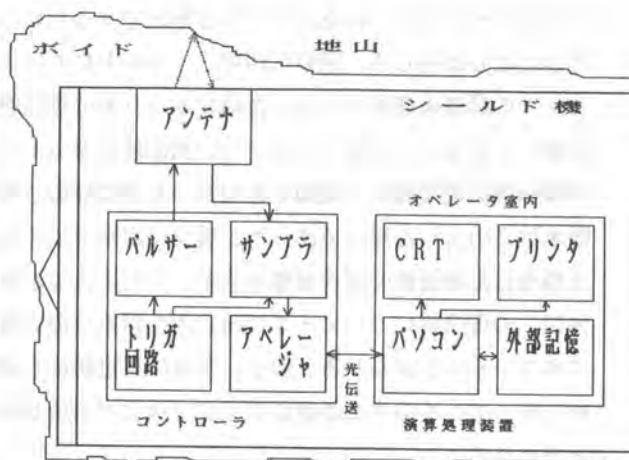


図-1 ボイドシーカの構成

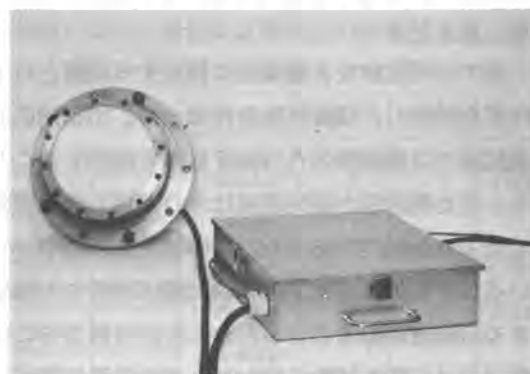


図-2 アンテナとコントローラ

## 2) コントローラ部

コントローラは、アンテナの近傍に設置される。パルサーは、電圧20 [V<sub>p-p</sub>] 周波数1 [GHz]の高周波モノサイクルパルスを生成し、トリガ回路の送出タイミング周期1 [μSEC]で、送信アンテナに対して送出する。また、サンプラは、受信アンテナからの信号波形を、低周波に変換し、さらにアバレージャは、A/D変換、加算平均処理を行ない、演算処理装置とのデータ伝送を行なう。

コントローラ部は、シールド機内の作業場所付近に設置されるので、温度、湿度などの耐環境性を考慮して設計した。特に、データ伝送に関しては、モータ等のノイズ源からの悪影響を避けるため、光伝送を採用した。

## 3) 演算処理装置部

演算処理装置は、オペレータ室内に設置される。コントローラから送られてくる受信信号を1リング掘削作業に合わせて2次元情報に変換し、表示、記録、日報印刷などを自動的に行なう。また、計測終了後に、各種画像処理を行なってデータの解析を行なう。さらに、コントローラに対して、加算平均回数(最大1024回)や、計測レンジ(25、50、100 [nsec])などの計測パラメータの設定を行なう。

図-3に受信信号の2次元変換原理図を示す。反射波形を256点に分割し、各点の強度に応じて、16段階の濃淡をつけて、シールド機の掘削距離に合わせて表示することで、シールド機械天端近傍地山の2次元断面図が表示される。

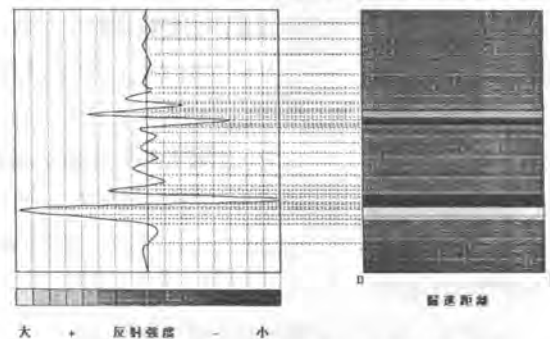


図-3 受信信号の2次元変換原理図

## 3. 自動計測

本装置は、オペレータの作業負担を増やさないようにカット回転指令、推進ジャッキ伸び指令、及び、ジャッキストローク長から、計測の開始、終了信号を検出して、自動的に、計測を行なうようにした。図-4に自動計測フローを示す。

- ・カット回転指令、推進ジャッキ伸び指令ともにオンで計測開始信号が発生し、計測状態になる。
- ・計測状態で、掘進長さが4mm増加するごとに1ラインずつデータを記録してゆく。
- ・計測状態で、カット回転指令、推進ジャッキ伸び指令がオフしたときに、ジャッキストローク長が指定長さ(≒1リングの長さ)を越えていれば、計測終了信号を発生して、計測を終えて、レポートを印刷する。また、指定長さを越えていなければ、休止状態になり、記録を一時中止する。

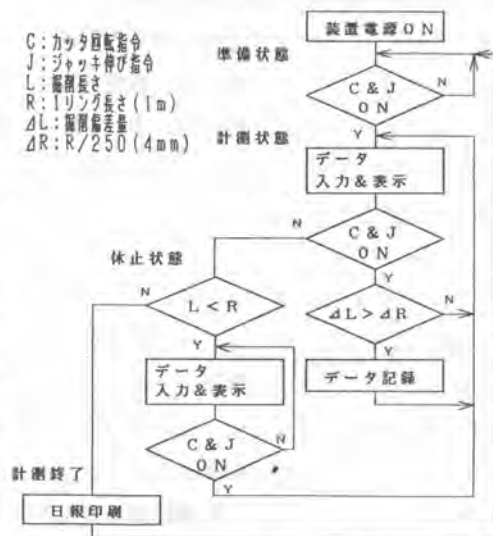


図-4 ボイドシーカの自動計測フロー

#### 4. 画像処理

本装置は、微小な信号波形を検出するため、減算処理、相関演算処理、STC処理など各種処理機能を持つ。

##### ・減算処理

本装置は、送受アンテナを別々にもつタイプであるので、送信アンテナと受信アンテナの間の電磁波のダイレクトカップリングが、アンテナ近傍からの信号をマスクしてしまうという問題があるが、予め、ダイレクトカップリング波のみを計測し、それをメモリ内に蓄えて置き、計測波形より減ずることにより、反射波形のみを抽出することができる。図-5にアンテナと地山の間隔が2 [cm] の場合の波形の減算処理結果を示す。

A波は地山が近傍にある場合の受信波形である。B波は同一媒質における、ダイレクトカップリングのみの受信波形である（即ち、地山が遠方にある場合）。どちらも、アベレージで100回平均化してある。ここで、A波から、B波を減ずることで、C波を得るが、この波形が、近傍地山からの反射波形を示している。

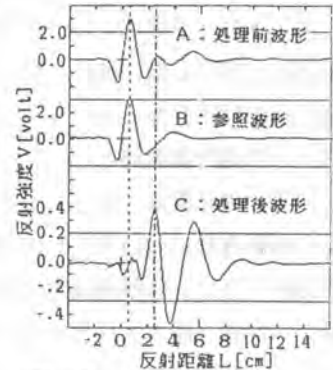


図-5 減算処理波形  
間隔2 cmの場合

##### ・相関演算処理

反射信号と同じ周波数成分を持つ信号を強調することで、S/N比の向上をはかる。図-6に処理ブロック図を示す。メモリ内に地山からの反射波形を参照波として蓄えて置く。計測波と、参照波をフーリエ変換し、掛け合わせ、再びフーリエ逆変換を行なうことで、S/N比の向上した波形が得られる。

##### ・STC処理

深さ方向に応じて、信号ゲインを増大させることで、深い位置からの微小な反射信号を強調する。また、同時にダイレクトカップリング波を抑制するので、近傍から、遠方まで全ての時間領域に渡って、信号波の検出が可能である。

##### 相関演算

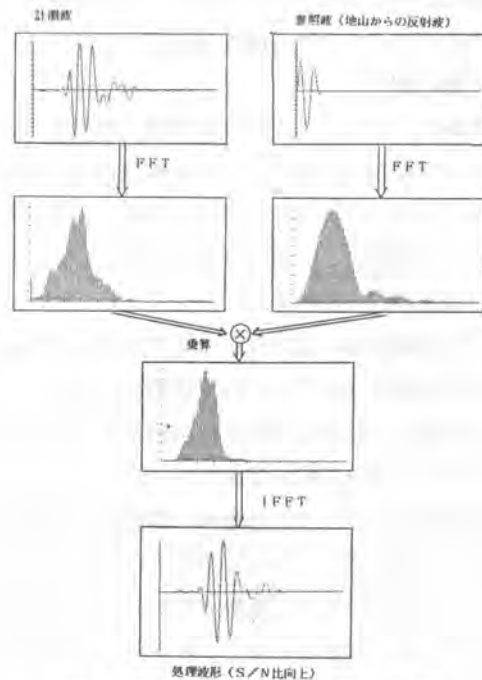


図-6 相関演算処理ブロック図

## 5. フィールドテスト

本装置を名古屋地下鉄椿町工区納入の当社製泥水シールド機械（TM725W）に取り付けて、昭和62年12月から、昭和63年4月までの間、計測を行なった。得られた結果を図-7、図-8、図-9、図-10に示す。

### 〔I〕安定した掘削

図-7は、掘削後の地山に何の変化もおこらなかった例である。図の下方に平行に走っている白黒の帯が、ダイレクトカップリング波と近傍地山からの反射の合成であって、この場合は、減算処理によって地山とスキンプレートの間隔が、約1 [cm] であることが判った。

### 〔II〕地山内の異物

図-8は、地山内に地山土質と電気的性質が大きく異なるものが存在している波形である。この前後で、排泥管から、れきが排出されたことから考えて、これもその1つであると推定される。

### 〔III〕空洞

図-9（相関演算処理画面）は、地山内に幅約20 [cm] 深さ約10 [cm] 程の空洞が生じていることを示している。規模が小さいため、裏込め量、掘削乾砂量等に大きな影響は現われなかった。

### 〔IV〕地山の緩み

図-10（STC処理画面）では、左下から右上にかけて、（掘削方向）不安定で、微弱な反射が広がっている。この計測位置の裏込め量が、他の場所に比べて、多かったことから考えて、これは地山の緩みを示しているのではないかと推定される。

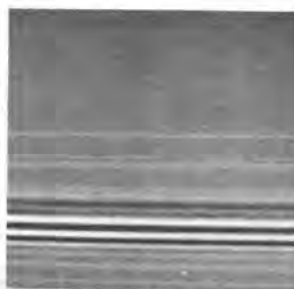


図-7 正常掘削時の計測画面

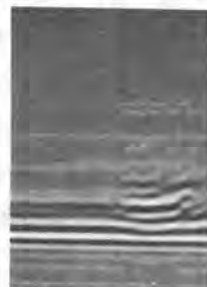


図-8 異物が存在した場合の計測画面

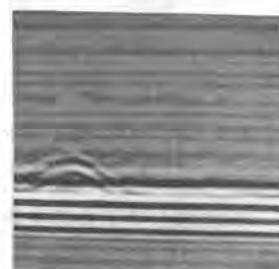


図-9 空洞が生じた場合の計測画面

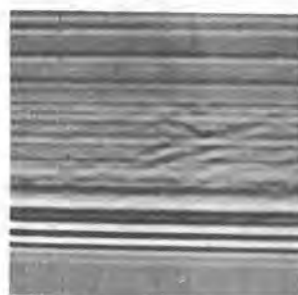


図-10 地山の緩みを示す計測画面

## 6. まとめ

UHF帯の電磁波を用いた泥水シールド機械用の地山探査レーダシステム=ボイドシーカを開発し、名古屋地下鉄椿町工区にて、4ヶ月間地山の観測を行なった。その結果、本装置がシールド機械近傍0～30 [cm] の空洞、異物などの地山の変化をとらえることができること、過酷な環境の中（温度、湿度、水圧等）でも問題なく動作することを確認できた。

最後に、この装置のフィールドテストの実施、及び本稿をまとめるにあたり、シールド施工に関する様々ご助言を頂いた名古屋市交通局、及び、鹿島・飛鳥・大豊・東亜建設共同企業体 地下鉄椿町工区JV工事事務所の皆様に心から感謝の意を表します。