

# 地中レーダの高性能化の研究

梅野正義・広瀬延孝\*・小池宗弘\*\*・武富喜八郎\*  
伊藤保之\*\*\*・杉野 徹\*\*

電気情報工学科

(1986年9月6日)

## Development of Underground Radar

Masayoshi UMENO, Nobutaka HIROSE, Munehiro KOIKE  
Kihachirou TAKETOMI, Yasuyuki ITOU and Touru SUGINO

Dept. of Electrical and computer Eng.

(Received September 6, 1986)

In this paper the operational principles and system of underground RADAR are first described along with their historical development.

Underground RADAR is then applied to the detection of leakage in underground water pipes.

Lastly methods of high performance operations such as the use of underground RADAR in the detection of water leakage are presented along with the problems encountered in its development.

### 1. ま え が き

電磁波を利用して地中に埋設した水道管、ガス管、下水管、電力ケーブルなどを検出したり、地中空洞の存在や地中内部の状態を非破壊的に探査することができる、地中探査レーダが研究されることになり、電気・水道・ガス・土木・建設および歴史的地下埋設物検査などの事業分野から注目を浴び、各分野における地中構造物の検出、その状態の監視の目的で、地中探査レーダの研究開発が活発に行なわれるようになってきた。電磁波を地表から地中に放射させ、地中に埋設された物標による反射信号から、地中の状態・埋設物位置・その材質および形状などを探査するためには、地中レーダ固有の技術上の問題があり、探知距離の増大、分解能の向上、不要反射波（クラッタ）の除去から物標識別のための信号処理法の開発および地中レーダシステムの小型軽量化など数多くの問題点が残されており、本報告では、名古屋市水道事業における配水管の地中探査を通じ、地中探査レーダ法により水道管からの漏水発見技術の向上と、地中探査レーダを高性能化するための問題点について述べる。

### 2. 地中探査レーダ法の基礎理論

#### 2.1 地中探査レーダの探査距離

地表上から地中の物標に対して、電波を放射する場合を考えると Fig. 1 のようになる。

地中レーダの送信電力  $P_t$  に対し、物標で反射されアンテナに戻ってくる反射電力  $P_r$  は、つぎのレーダ方程式で求められる。

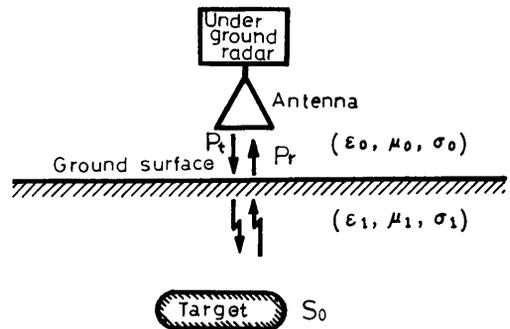


Fig. 1 Underground radar and its target.

\* 名工大情報工学科卒研究生 (昭和61年3月卒)

\*\* 名工大電子工学科卒研究生 (昭和60年3月卒)

※ 岐阜工業高等専門学校 電気工学科

\*\*\* 鈴鹿工業高等専門学校 電気工学科

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot L_T \cdot S_0 \cdot L_R \cdot G_R \cdot L_p \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \cdot e^{-4\alpha R} \quad (1)$$

ここで、 $G_t$ ：送信アンテナの利得、 $L_T$ ：送信アンテナと大地との結合損失、 $S_0$ ：地中の物標のレーダに対する反射断面積、 $L_R$ ：受信アンテナと大地との結合損失、 $G_R$ ：受信アンテナの利得、 $L_p$ ：地中における媒質中の電波の伝搬損失、 $\lambda$ ：使用電波の自由空間波長、 $R$ ：アンテナから物標までの距離である。後で述べる透過係数： $T$ と反射係数： $R$ とは、 $L_T = |T|^2$ と $L_R = |R|^2$ の関係がある。

地中探査レーダが探知できる最大探知距離  $R_{\max}$ は、レーダの受信機内で発生する雑音と、等しい最小受信可能電力を  $P_{r-\min}$ とすると

$$P_{r-\min} = K T_0 B F_n (S/N) \quad (2)$$

であり、この値が(1)式の受信電力に等しい距離  $R_{\max}$ は

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_t \cdot G_t^2 \cdot L_T \cdot L_R \cdot L_p \cdot S_0 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot K \cdot T_0 \cdot B \cdot F_n \cdot (S/N)} \right]^{\frac{1}{4}} \cdot e^{-\alpha R} \quad (3)$$

として、最大探知距離が求められる。ここに、 $K$ ：ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )、 $T_0$ ：レーダ受信機の等価雑音温度、 $B$ ：レーダ受信機の等価雑音帯域幅、 $F_n$ ：雑音指数、 $S/N$ ：信号電力対雑音電力比を表わす。具体的な数値をもとに、地中媒質の誘電特性をパラメータとして、送信電力  $P_t$ と最大探知距離  $R_{\max}$ の関係より、それらの結果の要点を述べると、使用周波数  $f = 100 \text{ MHz}$ における送信電力  $P_t = 1 \text{ (W)}$ の地中レーダの探知距離は、土質が湿った砂では誘電率  $\epsilon_{1s} = 30$ 、誘電損  $\tan \delta_{1s} = 0.03$ とすれば約  $5 \text{ (m)}$ となり、乾燥した砂地 ( $\epsilon_{1s} = 6.0$ 、 $\tan \delta_{1s} = 0.03$ )であれば数十mの深さまで探知できるが、砂地が水で飽和されている場合には真水の  $\epsilon_{1w} = 81$ 、 $\tan \delta_{1w} = 0.07$ とすると約  $3 \text{ (m)}$ に減少する。これらの計算は送受信電力のみについて行ったもので、地中内部の不均一性による周囲からの不要モード入力、位相定数の変化によるパルス波形の歪みなどを考慮すると、さらに探知距離を短く見積ることが必要である。

## 2.2 地表面での反射と屈折

地中レーダのアンテナから発射された電磁波は、空気中から地中に進入するとき、媒質の異なる境界面（地表面）で反射する反射波と、地中に進入する入射波に分かれる現象を生じる。また、電磁波が境界面に対し斜めに入射するときは、光の場合と同じように、電磁波の経路に屈折する現象が生じる。ここで、Fig. 2のように、電磁波が地表面に垂直に入射する場合の境界面での入射波、透過波、反射波の電界をそれぞれ  $E_i$ 、 $E_t$ 、 $E_r$ とすれば

$$E_t = T \cdot E_i \quad (4)$$

$$E_r = R \cdot E_i \quad (5)$$

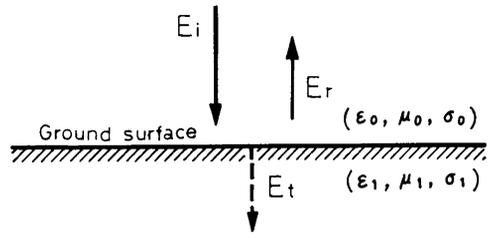


Fig. 2 Reflection and transmission of electromagnetic wave.

として表わされる。ただし  $T$ ：透過係数、 $R$ ：反射係数で媒質の誘電率、透磁率、導電率によって決定されるものである。

$$T = \frac{2 \mu_1 K_0}{\mu_1 K_0 + \mu_0 K_1} \quad (6)$$

$$R = \frac{\mu_1 K_0 - \mu_0 K_1}{\mu_1 K_0 + \mu_0 K_1} \quad (7)$$

$$K_0 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 (1 - j \tan \delta_0)} \quad (8)$$

$$K_1 = \sqrt{\epsilon_1 \mu_1 (1 - j \tan \delta_1)} \quad (9)$$

$$\tan \delta_0 = \frac{\sigma_0}{\omega \epsilon_0} \quad \text{および} \quad \tan \delta_1 = \frac{\sigma_1}{\omega \epsilon_1} \quad (10)$$

$\epsilon_0$ 、 $\mu_0$ 、 $\sigma_0$ は空気、 $\epsilon_1$ 、 $\mu_1$ 、 $\sigma_1$ は媒質(地中)の誘電率、透磁率、導電率を表わす。地中の透磁率は  $\mu_0 = \mu_1 = 1$ とみてよい。空気の誘電損  $\tan \delta_0 = 0$ および比誘電率  $\epsilon_0 = 1$ とみなされるが、地中はそれらを構成する組成や含水率などにより、 $\epsilon_1$ と $\sigma_1$ が大きく変化する。

斜めに電磁波が入射するときは、光と同じように境界面で電磁波は屈折する。地表面と平行な偏波面をもつ電磁波の場合は、入射角  $\theta_0$ と進入角  $\theta_1$ との関係は相対屈折率  $n$ より

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_0} = \sqrt{\frac{\epsilon_1 \mu_1 - j \frac{\mu_1 \sigma_1}{\omega}}{\epsilon_0 \mu_0 - j \frac{\mu_0 \sigma_0}{\omega}}} \quad (11)$$

として表わされる。

地中内に地層があるときには、それぞれの地層の境界面において、反射波を発生するため電磁入射波は、その都度減衰することになる。

## 2.3 地中媒質による電磁波の減衰

普通地中は空気中よりも電磁波の減衰は大きく、振幅、位相も共に変化する。またさらに、この減衰の大きさと位相の変化が使用周波数で変化する分散性の媒質と考えることができる。地中の電磁波が距離  $d$ だけ進行するときの地中の伝搬定数  $\gamma$ は、 $\gamma = \alpha + j\beta$ により電界の振幅、位相は共に、 $\exp(-\gamma d) = \exp(-\alpha d) \cdot \exp(j\beta d)$ のような減衰と変化を受ける。ここで減衰定数  $\alpha$ と位相定数  $\beta$ は

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\epsilon_1 \mu_1}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_1}{\omega \epsilon_1} \right)^2} - 1 \right\} \right\}^{\frac{1}{2}} NP/m \quad (12)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\epsilon_1 \mu_1}{2} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_1}{\omega \epsilon_1} \right)^2} + 1 \right\} \right\}^{\frac{1}{2}} rad/m \quad (13)$$

で、それぞれ表わされる。

地中における電磁波の伝搬速度  $v$  は

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\epsilon_1 \mu_1} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma_1}{\omega \epsilon_1} \right)^2} + 1 \right\}}^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

となり、 $\alpha, \beta, v$ は地中媒質の $\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$ と電磁波の角周波数 $\omega$ によって、電磁波の減衰と位相変化が現われることがわかる。

地中を湿った媒質と考えて、比誘電率 $\epsilon_1 \approx 10$ 、導電率 $\sigma_1 \approx 3 \times 10^{-3} (S/m)$ 程度であるから、(6)式と(7)式で計算すると透過係数は $T \approx 0.48$ 、反射係数は $R \approx 0.52$ となる。これらを送信電力で考えると、地表面における結合の損失は、地中に進入するときと、地中から出るときを考慮合わせると、

$$|T|^2 \cdot |R|^2 = 0.062 \quad (15)$$

となり、 $-12 \text{ dB}$ の減衰が生じる。

このような減衰性媒質における電磁波の伝搬は、低い周波数では、ほとんど周波数に比例して減衰量が増加し、 $\tan \delta_1 = \sigma_1 / \omega \epsilon_1 = 1$ となるような周波数より高い周波数範囲においては、減衰量は一定となる。しかし、電磁波の位相が周波数に比例して変化するために、パルス波形に歪みが発生してくる。

### 2.4 地中における電磁波の伝搬速度と深度距離

地中媒質における電磁波の速度は(14)式で与えられる。普通の土壌は、導電率が小さく( $\sigma \approx 0$ )、非磁性体( $\mu = 1$ )として考えることができるので(14)式は、

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1}} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_{1r}}} \quad (16)$$

として表わされる。 $C$ :自由空間での電波の速度( $C = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )で $\epsilon_{1r}$ は地中媒質の比誘電率である。普通の土壌の比誘電率は $\epsilon_{1r} = 4 \sim 50$ 程度であるから、地中の電波の伝搬速度は空気中の速さに比べ $1/2$ から $1/7$ 程度遅くなる。

地中レーダは、電磁波がアンテナから地中に向けて発射され、物標で反射された信号がアンテナに戻るまでの往復時間 $\tau$ から次の式で、物標までの距離 $d$ を算出することができる。

$$d = \tau / 2 \cdot v \quad (17)$$

$v$ は地中での電磁波の伝搬速度で、(14)式により求められるが、地中媒質の電気的定数を知る必要がある。しかし、

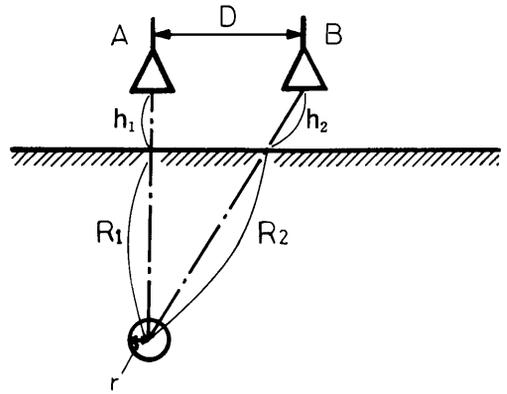


Fig. 3 Measurement of target position in the case of unknown electric properties.

次のような近似計算をすることにより、地中媒質の電気的定数が未知なる場合についても、物標までの距離 $d_1$ を測定することができる。Fig. 3のように、地中レーダのアンテナが物標の真上に位置するときと、地表面上で $D (m)$ 離れた位置に移動した時の場所で測定した電波の往復時間を、それぞれ $t_1$ および $t_2$ とすれば、次式となる。

$$t_1 = \frac{2 h_1}{C} + \frac{2 (R_1 - r)}{v} \quad (18)$$

$$t_2 = \frac{2 h_2}{C} + \frac{2 (R_2 - r)}{v} \quad (19)$$

ここで、 $C$ :自由空間での電波の速度、 $v$ :地中での電波の速度、 $h_1$ :アンテナの物標に対する垂直方向の地表からの距離、 $h_2$ :アンテナの物標に対する斜め方向の地表からの距離、 $r$ :物標の半径である。

Fig. 3の図形から三角形の公式を用いると、

$$\frac{h_1}{R_1 + h_1} = \frac{h_2}{R_2 + h_2} \quad (20)$$

および

$$(R_1 + h_1)^2 + D^2 = (R_2 + h_2)^2 \quad (21)$$

を得ることができる。物標の埋設位置が深さ $R_1$ と比較して、大きさ $r$ が小さく、地中レーダのアンテナが地上近くの $h_1$ であるとすれば、地表から物標までの深さ $d_1$ は、(20)式と(21)式から近似的に、

$$d_1 = \frac{t_1 D}{\sqrt{t_2^2 - t_1^2}} - h_1 \quad (22)$$

として、地中媒質の電気的定数を用いなくても算出することができる。しかし、アスファルト舗装とかコンクリート舗装があったり、地中内部が不均一な媒質である場合、または媒質の含水率が異なる場合には、埋設深さの距離を正確に求めることは困難である。

### 3. 漏水探知レーダ・システムの構成

Fig. 4 に、本実験で使用したレーダ・システムの構成を示す。

電源は二電源方式で A.C 100V または D.C 12V に接続され、アンテナ部にはハード的なものが組み込まれており、本体においてアンテナ部の制御と信号処理を行っている。またアンテナ部は移動が可能ないように車輪が取り付けられ、その車輪には距離検出用の信号発生器が取り付けられている。

本体の信号処理部には、同期・距離・ビデオの各出力端子があり、この端子に出力されるアナログ信号を A/D 変換器を通して、データ記憶用のパソコン (PC-8801 FR) のディスクに生データが記録される。記録されたデータは処理用のパソコン (PC-9801 VM) により、データ処理が施され迅速に出力されるようになっている。

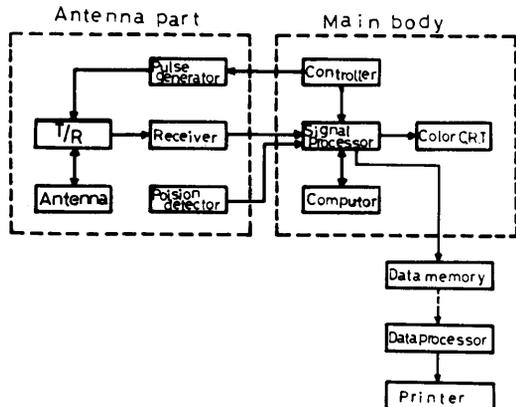


Fig. 4 Block diagram of the underground radar system.

### 4. 地中探査レーダによる漏水探知法

#### 4.1 漏水探知に地中レーダを利用する意義

最近、大都市における水道管の維持管理は、施設の老朽化および埋設管の道路使用状態の激化にとまらぬ諸現象、都市構造の集積による地中埋設物の複雑化などに対処するために、幅広い対応策が要求されている。長大な延長距離の給配水管をかかえている大都市水道局では、それらの対応策として、経年配水管の取替、給水管のステンレス化、漏水防止作業におけるエレクトロニクス技術の導入など、電磁波によるリモートセンシングの積極的な取り組みを行っている。しかしながら、地中埋設物が複雑化している市街地では、地下の状況を正確に知ることが非常に困難であるため、給配水管の維持管理に多大な労力と時間を必要としている。これらの効率化を図

る方法として、最も有力視されている新しい技術の一つが地中探査レーダ法である。

#### 4.2 地中レーダによる漏水探査法

漏水発見方法の基本的な考え方は、Fig. 5 に示したシステムの仕組みである。この図のように、地表上のアンテナから地中に向けて電波を放射し、地中内に埋設された水道管の表面で反射された反射電波を受信し、これを受信信号としてコンピューターで信号の処理を行い、電波の反射時間と反射電波の強さをカラー CRT に形や色彩によって表現する。この場合、水道管が埋設されている普通の土壌の比誘電率  $\epsilon_1$  は、電波の周波数が 100 MHz では  $\epsilon_1 = 4 \sim 10$  で、水道水の比誘電率  $\epsilon_2$  は、 $\epsilon_2 = 81$  である。そこで水道管から漏水している水が水道管の周辺に滞留して含水率が高くなった土壌の比誘電率  $\epsilon_{12}$  は、 $\epsilon_{12} = 40 \sim 50$  と考えられる。

地中内での電波の伝搬速度は(10)式で表わされるので、漏水個所の電波の伝搬速度は遅くなり、漏水のない管路に比べ地中レーダの CRT 画面は、給配水管の反射エコーが下方へ湾曲して表示される。また管路から漏水した水により、管路周囲の土壌が洗い流され空洞が存在する場合には、空気 の比誘電率  $\epsilon_0$  が  $\epsilon_0 = 1$  であるため逆に現われる。このような方法により、漏水個所の位置や漏水の状態を地中レーダの CRT 画面の形や色彩から探知するものである。

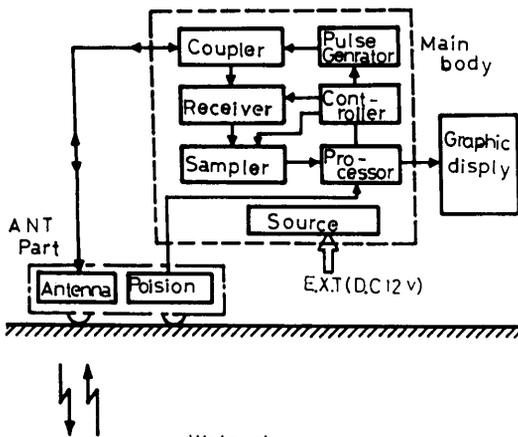


Fig. 5 Detection system of water leakage.

### 5. 漏水探査レーダシステムと信号生データの取り込み法

地中探査レーダ本体の制御部パネルからは信号波形をサンブラ出力信号、ビデオ出力信号として外部に取り出

せるようになっている。また、同期信号も送信波の電磁パルスと同期して取り出すことができ、距離信号もアンテナの移動距離に合ったパルス信号で、取り出しが可能である。そこで、Fig. 4のようなシステム構成を組み上げて、これらの各信号をデータ記憶装置のフロッピーディスクに取り込んでから、信号処理と波形処理をデータ処理装置で処理をする。そしてその結果の表示出力をプリンタにより、カラー表示波形およびカラー図面として取り出す方法の改良を行なった。波形データ取り込みのシステム構成については、地中探査レーダからのアナログ信号は低周波化されており、アナログ/デジタル(A/D)変換はごく簡単である。Fig. 6はデータ取り込みシステム構成である。

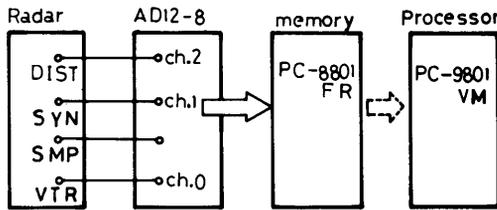


Fig. 6 Data processing system.

A/D変換器(AD 12-8)は、データ記憶用パソコン(PC-8801 FR)の拡張スロットにプラグインされて、パソコンの一部として動作している。データ処理用パソコンのROMに、データ処理プログラムを固定したり、データ処理専用のモジュールを搭載して実時間処理を行い、反射エコー信号の立体的表示から地中断面図などを画像化するために、信号処理の高速化と高性能化を目的に改良したシステムである。

5.1 信号生データの特性

地中レーダのアンテナから発射される電磁パルスは、制御部からの同期信号パルス(50 KHz)に同期して、6 nSのモノサイクルパルスが送信機より、送受切換器を通してアンテナに給電され地中に向けて発射される。このモノサイクルパルスの出力波形は150 V<sub>p-p</sub>で、アンテナに給電される電力は90 W<sub>p-p</sub>で、Fig. 7で示すような波形

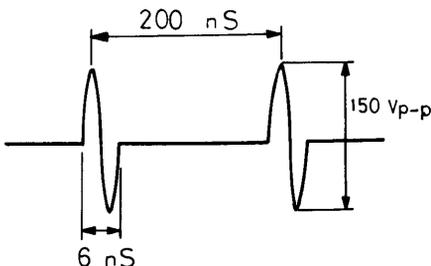


Fig. 7 Transmitting monocycle pulse wave.

である。アンテナ部は送受切換器により、送信パルスが発射された後、200 nSの間は受信アンテナとして動作し、反射信号を受信する。この受信アンテナの周波数特性は広帯域なもので、使用周波数50~500 MHzで電圧定在波比(VSWR)は2以下の平面ダイポールアンテナである。受信機は、約50~60 dBの利得を有する広帯域RF増幅器により構成され、強い地表面や地表面上の物標による反射波によって、受信機が飽和するのを防ぎ、さらに、電磁パルスの地中伝搬損失を補償するために、STC (Sensitivity Time Control)回路が設けられ、制御回路からの同期パルスに同期して、受信機の利得は約60 nSの間に40 dBの感度変化を受けている。受信機に送られた受信信号は、地中物標による反射波の戻りが速いため、短時間に同一受信波形を多数繰り返し得られるので、VHF帯のスペクトルを持つ受信信号はサンプリング回路により、同期信号に同期した低周波信号に変換され、信号処理部へ送られる。ここで、変換された後の6 nSのモノサイクルパルスの幅は1.2 mSに、送信パルスの繰り返し周期は40 mSに拡大され、低周波の受信信号となる。ここで、低周波に変換された受信信号は、本体の信号処理部と制御部に送られ、制御部パネルの出力端子より、拡張されたデータ記憶用と処理用のパソコンに入力されて、生データと処理データがパソコンのCRTとプリンタによりデータ出力として表示される。

地中レーダのアンテナ静止状態において取り込まれた生データの一例がFig. 8である。縦軸は、反射エコーの相対信号強度を表わし、波形の正負は、受信電界の方向である。横軸は、送信パルスの位置を基準としたときの、反射エコー信号の到達時間であり、これは地表面からの深度方向と距離の情報を含んでいる。この図からでもわかるように、ほぼ1周期よりも長い時間(220 nS)の間の

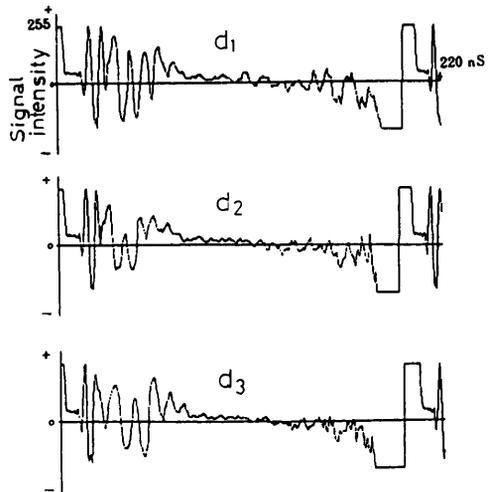


Fig. 8 Realtime signal of detected wave.

反射信号を取り込んでいる。また、最初の Peak の立下り位置は取り込みタイミングの若干のずれにより、8 nS 程度の差が発生するため、波形処理においては、すべて立下り位置を基準に表示している。

5.2 生データの信号処理と解析

生データの波形より、地中媒質の減衰率や誘電率および物標の埋設位置などは、ある程度判断することができるが、地中内の構造や状況および埋設物の材質や状態を総合的に判断するには、情報不足のため困難である。また、生データには、多くの雑音や多重反射などが含まれており、これらの不要反射波は、生データを平滑化する処理を行い除去してから、必要な情報を二次元非線形フィルタ処理やFFT処理およびケプストラム処理を行い、解析が容易な信号として情報を抽出して、カラー画像表示やカラー図面表示およびデータ処理波形として画像化し、総合判断するシステムである。

5.2.1 データ平滑化による雑音除去

この雑音除去法は、線形処理による生データ信号の深度方向の平滑化を行い、平滑することによりS/N比を向上させている。すなわち、Fig. 9 のように5ビットの生データ信号（正負符号つき）の代数和をとり、その値を平均化した絶対値を1つのビットの表示値とする方法である。

$$F(z) = \left| \frac{f(z-1) + f(z) + f(z+1) + f(z+2) + f(z+3)}{5} \right| \quad (23)$$

処理データは(23)式のような計算をして、雑音を抑制している。

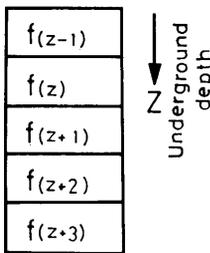


Fig. 9 Bit signal along the depth.

6. 測定結果と処理データの解析

通常の給配水管は、道路敷に深さ0.5~2.0(m)に埋設され、埋戻し材は山砂が使用されている。水道管の漏水探査は、測定場所により路面の状況および地中状態が異なるため、名古屋市水道局のモデル実験場において、基本的な空洞モデル・地質モデル・配管モデルおよび水道管の漏水状態を再現する漏水モデルを作り、光電製作所

製の地中探査レーダを改良して、基礎データの取り込みを行い、それらの生データ波形と処理データの解析について述べる。

6.1 空洞モデル

Fig. 10 の空洞モデルの地表面にアンテナを静止させ、データの取り込み実験を行った。A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>は生データ波形を表示させたものである。サンプリング点数は100 nS の間に231点で表示されている。この実験では発泡スチロール層を空洞と仮定し、地質を山砂と碎石により構成した。

生データ波形を比較すると、A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub>の波形からもわかるように、波形の最初の a 点に表われる部分は、どの生データについても同一の形状をしている。これは、時間的に早く受信された信号であるため、地表面からの反射であると考えられる。ここで、各データ波形の a 点を地表面として、以後のデータ比較においては、横軸を一致させるためすべての生データの第1ピーク(a点)を基準に考える。空洞モデル(A)のデータ波形では e 点において大きな波形が表われている。この波形は、発泡スチロールの上面での反射と仮定して、(16)式と(17)式により、乾いた地中の山砂の比誘電率 ε<sub>1r</sub>を ε<sub>1r</sub>=4 として、発泡スチロール上面までの深さを算出すると、a 点から e 点までの時間は7.3 nS であるから、深さ d は d = 0.55(m) となる。空洞モデルの山砂の層の0.5(m)と良く一致する。また、山砂の層0.5(m)から比誘電率を算出すると ε<sub>r1</sub>=4.8として求まる。つぎに、発泡スチロール上面での負の反射を f 点、下面での反射を g 点とすると、その間の時間は3.9 nS であるから、発泡スチロールの比誘電率 ε<sub>r2</sub>も同様にして ε<sub>r2</sub>=1.4として求まる。山砂と発泡スチ

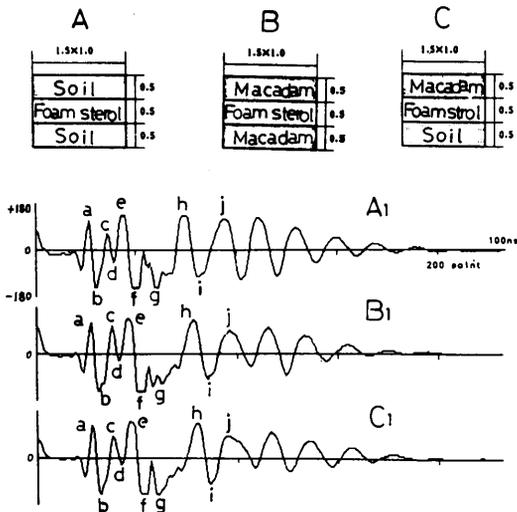


Fig.10 Detector signals in various hollows.

ロールの比誘電率  $\epsilon_{r1}$  と  $\epsilon_{r2}$  から、深さ1.5(m)の山砂下面での電波の往復時間  $\tau$  を求めると  $\tau=19$  nS となり、生データ波形の a 点から h 点までの時間20 nS と良く一致した値になるので、h 点を空洞モデル下面での反射であると推察できる。(B)の生データ波形についても同じようにして、碎石の比誘電率  $\epsilon_{r3}$  を求めると  $\epsilon_{r3}=5.5$  となり、生データ波形と計算値が良く一致しており、(C)のモデルも  $\epsilon_{r1} \cdot \epsilon_{r2} \cdot \epsilon_{r3}$  により算出した時間と生データ波形の値は良く一致している。

### 6.2 地質モデル

ほとんどの給配水管は、Fig. 11 のような地質モデルの中に地表面より0.5~2 (m)の深さで埋設されている。この地質モデルの深さ1.5(m)における山砂下面での反射時間は、 $\epsilon_{r1} = 4$  とすると、 $\tau=21.9$  nS として算出される。生データ波形の a 点から g 点は19.1 nS であり、波形の形状から下面での反射と考えると良く一致している。つぎに、これらの生データを  $5 \cdot 2 \cdot 1$  で述べた方法により、平滑化処理を行った処理データ波形は、地中の反射境界面に対応する部分は、比較的強い相対強度として、表示され雑音などによる小さい波形は表示されないで解析する時に都合が良い。しかし、個々のピーク位置が明確に表示されないで、情報量が少なくなる恐れがあり、データを解析する波形としては好ましくない。この処理データ波形を滑らかな画像として現わすときには有効な処理データ波形が得られた。

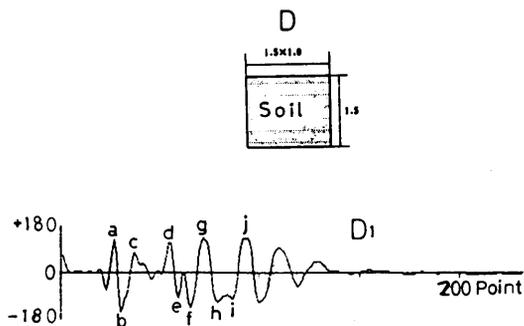


Fig.11 Detector signal in uniform soil.

### 6.3 配管モデル

配管モデル実験は、Fig. 12 のように(A)・(B)・(C)の位置で、アンテナを静止して、データの取り込み実験を行った結果の生データ波形が(A<sub>1</sub>)・(B<sub>1</sub>)・(C<sub>1</sub>)である。地質モデルの場合と同じように、(B<sub>1</sub>)の波形において、a 点は地表面での反射とし、e 点と f 点に強い反射波形が表われている。この e 点を配管よりの反射信号とすると、a~e 点の時間は、13 nS で  $\epsilon_{r1} = 4$  とすると、深さ d=0.97(m) となり、配管の埋設深さと良く一致する。つぎに(A<sub>1</sub>)・(B<sub>1</sub>)・(C<sub>1</sub>)の波形変化を連続的に並べて、

立体表示したものがFig. 14 である。このように、Z 軸方向に(A<sub>1</sub>)・(B<sub>1</sub>)・(C<sub>1</sub>)と順に並べて表示すると、生データ波形の変化が連続した表現になり、地中の状況判断が理解しやすくなる。

Fig. 14 の立体表示は、Fig. 13 の波形を絶対値表示し、連続して並べたものである。このように表示すると、①のピークは波形の形状が連続しているで、明らかに地表面での反射であることがわかる。また、②のピークはアンテナが(A)から(B)に移動することにより、信号強

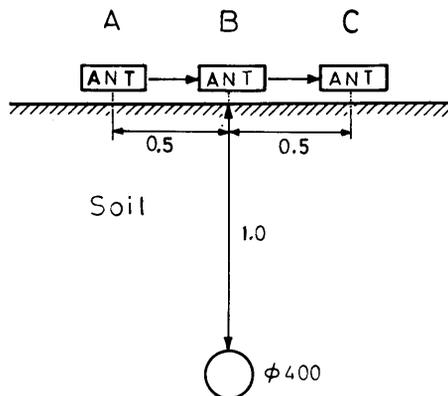


Fig.12 Configuration of water pipe and antenna.

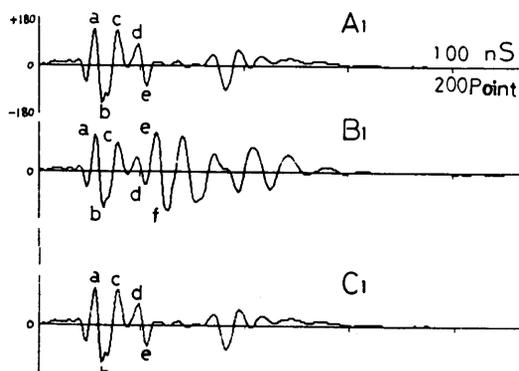


Fig.13 Detector signal in each position (A,B,C) of antenna.

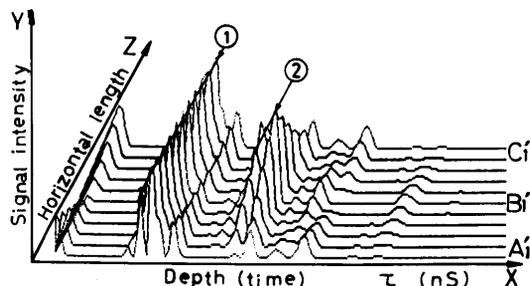


Fig.14 Flow pattern detector signals.

度が大きくなり(C)では小さくなっていることから、配管による反射信号として容易に判断することができる。

#### 6.4 漏水モデル

漏水モデル実験は、Fig. 15 のように $\phi 100$ の水道管の附近に $\phi 10$ の水道管を埋設し、止水栓により漏水状態を再現することができる。これまでに述べた測定データは、アンテナを静止させて、各個所での反射信号を生データとして取り込んだもので、実際に漏水探査などを行う場合には、非能率的であるために、アンテナを連続移動させて探査をする。そこで、漏水モデルについては、Fig. 15 に示すように、アンテナを連続移動して各位置における

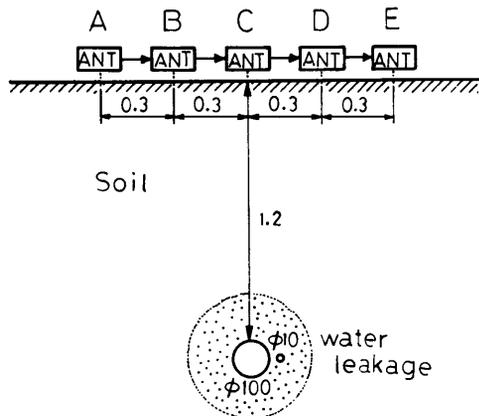


Fig.15 Configuration of leaking wave and antenna.

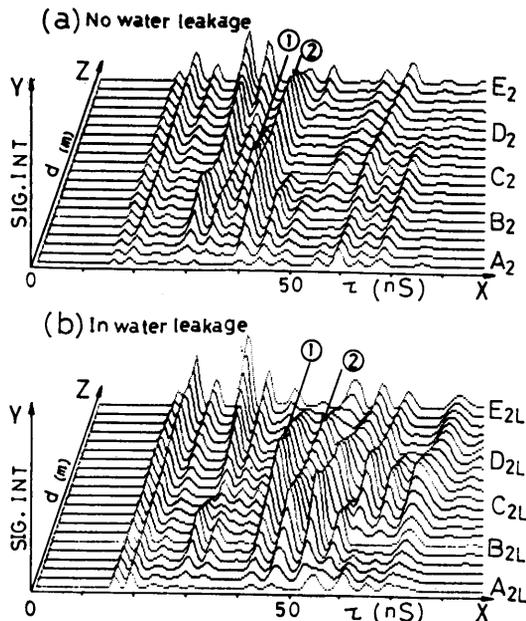


Fig.16 Flow pattern of detected signals.

(a) No water leakage.

(b) In water leakage.

瞬時のデータを取り込み平滑処理を加えた処理データの表示がFig. 16 である。なお Fig. 16 の(a)と(b)は、漏水前と漏水後の平滑処理データの立体表示波形である。漏水量については、止水栓を30秒間全開したときのデータである。

Fig. 16 (a)の漏水前の処理データ立体表示より、①のピークが  $C_2$  の位置で大きく表われていることから、 $\phi 100$ の水道管の反射と判断できる。また、(b)の漏水後においては、②の部分が、さらに大きい信号として表われている。この①と②を比較すると、②は時間的に遅れた位置に幅広く表われており、漏水した水により地中の誘電率 $\epsilon_{r1}$ が大きくなり、電波の伝搬速度が遅くなって、後方に表示されるものと考えられる。また、②のピークが幅広く表示されているのは、漏水による水が地中に浸透して、電波の反射する部分が大きくなったものと考えられる。

#### 7. ま と め

地中探査レーダを利用して、水道管の漏水を発見する、漏水探査レーダシステムの開発における、課題と問題点について述べる。まず、生データ波形により、水道管の埋設深さと地中媒質の状況を判断する情報を抽出し、実際の埋設深さと比較することにより、水道管の探査は連続して、探知することが可能であった。漏水個所の発見については、漏水部分のピーク波形の遅れと、連続したピーク波形の大きさが立体表示波形により、抽出できることから漏水の可能性があると判断できる。これらの判断を人間の判断と同様のアルゴリズムを作り、コンピュータで解析を行い判断させることは可能であると考ええる。しかし、これはコンピュータのハード分野でデータの並列処理などを必要とするので開発が待たれるところである。そこで生データおよび処理データの特徴を抽出して処理をする必要がある。

データ処理に関しては、簡単なものとして生データ平滑化処理と空間フィルタ法を適用させることが可能である。また他の処理法として有効と考えられるのは、信号エコーの多重反射の特徴を調べ、その多重反射成分を打ち消すことが可能になれば地中の状況や漏水の状態を可成り、鮮明に図面化することが可能であると思われる。

謝辞 本研究の一部は、名古屋市水道局の受託研究として行なったものであり、漏水実験場の提供等いろいろな面でお世話になり、名古屋市水道局関係者に深謝する次第であります。また、研究、実験に際して、ご支援をいただいた大成機工株式会社関係各位に感謝いたします。

## 文 献

- 1) P. J. B. Clarricoats : Portable Radar for the Detection of the Buried Objects, Radar 77 International Conference, IEE, London, 1977
- 2) 鈴木, 荒井, 他 : 地中探査レーダシステム, 電子通信学会技術報告, S A N E 79-40, 1979-1
- 3) 鈴木 : 電波による地中・水中の探査, 計測と制御, 20-8, 1981-8
- 4) 武富, 梅野, 島崎, 細井 : 海岸・河川構造物の内部空洞の非破壊検査システムの開発, 昭和56~57年度, 文部省科学研究費・試験研究(1)研究成果報告書
- 5) K. Iizuka, G. Steiner et al : Plasma Diagnostics with Computer-Imaged Microwave Holography, J. Appl. Phys, 53, 1982
- 6) K. Iizuka and A. Freundorfer : Detection of Nonmetallic Buried Objects by a Step Frequency Radar, Proc, IEEE, 71, 1983
- 7) 荒井, 鈴木 : 地中レーダシステム, 電子通信学会論文誌, J66-B, 1983-6
- 8) 武富, 梅野, 島崎, 細井 : 海岸・河川構造物の内部空洞の非破壊検査システムの開発, 昭和58~59年度, 文部省科学研究費・試験研究(1)研究成果報告書
- 9) 田嶋, 飯口 : 地中埋設物からの散乱波の解析, 電子通信学会論文誌, J68-B, 1985-12