

合成開口法による地下状況推定の研究

平成 18 年 度

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻

齋 藤 寛 人

平成 18 年度修了

合成開口法による地下状況推定の研究

指導教員 野村 由司彦 教授



三重大学大学院 工学研究科 博士前期課程

機械工学専攻 メカトロニクス研究室

齋藤 寛人

目次

第1章	はじめに	1
第2章	地中レーダ	2
2.1	地中レーダシステム	2
2.2	アンテナの指向性	4
第3章	合成開口法	6
第4章	双曲線形状のもつ特徴を考慮した合成開口処理	9
4.1	深さによる双曲線形状変化	9
4.1.1	深さによる双曲線形状変化を考慮した合成開口処理	9
4.1.1	深さが異なる複数の埋設管に対する実験	11
4.2	埋設管径による双曲線形状変化	14
4.2.1	埋設管径による双曲線形状変化を考慮した合成開口処理	14
4.1.1	埋設管径が異なる複数の埋設管に対する実験	15
4.3	埋設状況の媒質による双曲線形状変化	18
4.3.1	埋設状況の媒質による双曲線形状変化を考慮した 合成開口処理	18
4.3.1	土媒質中の異なる複数の埋設管に対する実験	19
第5章	むすび	21
	謝辞	22
	参考文献	23

第1章 はじめに

現在，地下構造は，水道管，ガス管，地下ケーブル等の人工物や地盤のゆるみによる空洞等，複雑な状況になっている．そして，道路工事等において地中に存在する埋設管やケーブル等の人工物を傷つけてしまったり，空洞により道路の沈下が起こり事故の原因になったりと，市民の生活に甚大な不便をもたらすことがある[1]．そのため，あらかじめ地下構造を知ることは重要な課題となっており，埋設物・空洞などの複雑な地下構造を，非破壊・非接触でイメージングする方法として，地中レーダ（Ground penetrating radar：GPR）が用いられている[2]．しかし，地中レーダ映像は電磁波の伝搬形態そのものが複雑である上に，ノイズ等の影響が大きく，地下構造の判別が困難であり，目標物を精度よく見つけるには熟練者の経験や知識に頼っているのが現状である．そのような経験や知識への依存度をできる限り下げべく，主として，地下構造など対象の実体をよりの確な情報として得るという意味で，鮮明な映像化を目指して各種の信号処理が研究されている[1]-[13]．例えば，医療用画像で広く利用されている対象物の空間スペクトルをあらゆる角度から取り，内部イメージングを行うトモグラフィ手法，ボアホールレーダ計測で得られる空間スペクトルに適用したイメージング手法がある[2][3]．また，衛星・航空機などに搭載され，地中レーダでも一般的に用いられるFFTを利用した大量・高速データ処理を行う合成開口処理等がある[4]-[6]．

本研究は，地中レーダで計測される受信波形の双曲線形状（一種の点拡がり関数ともいえる）が埋設物の深さ，形状，埋設状況の比誘電率（地中の電磁波伝搬速度）により変化するという特性によって，合成開口映像の品質が劣化することに注目している．すなわち，地中レーダにより得られた双曲線形状を解析することによって，埋設物を含む地下状況の情報を推定することができる．合成開口処理において，埋設物の深さ，形状，埋設状況の比誘電率を考慮した点拡がり関数を用いることで，地下埋設状況をより理解しやすくなる．このような考え方に類似する従来法としては，双曲線のエッジを抽出し，そのたわみの度合いから比誘電率を推定するものはあるが[7][8]，画像情報のまま用いて地下埋設状況を推定したものはなく，地下構造の実体をよりの確に推定することが期待される．

第2章 地中レーダ

2.1 地中レーダシステム

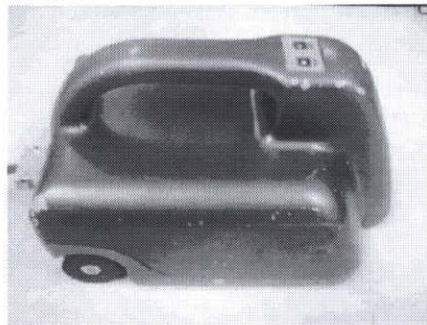
Fig.1 に、本研究で使用する地中レーダ（ライトエスパー2，アイレック技建㈱）を示す。Fig.1(a)に示すアンテナユニットには、送信アンテナと受信アンテナが収納されている。そして地中レーダの探査原理は、アンテナユニット底部の送信アンテナから地中に向けて電磁波を放射する。電磁波は埋設物等において反射するため、その反射波を受信アンテナで受信する（Fig.2 参照）そうすることにより電磁波が埋設物で反射してくるまでの伝搬時間 t を求めることができる。電磁波の伝搬時間 t は、

$$d = t / (2v) \dots\dots\dots (1)$$

$$v = c / \epsilon^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

を用いて、地表面から埋設物までの距離 d に変換できる。ここで、 c は光速 ($c=3 \times 10^8$ m/s)、 v は地中の電磁波伝搬速度、 ϵ は地中媒質の比誘電率を示す。

次に Fig.1(b)に示す処理装置は、各サンプリング点の走査結果を並べて、地中断面の測定映像を表示する。測定映像には、Fig.3(a)のように3つの埋設物が存在する場合、レーダが埋設物の上を横切る前後で、3つの双曲線形状の特徴的なパターン、すなわち埋設物の特徴が表れる（Fig.3(a),(b)参照）。



(a) Antenna unit



(b) Processing unit

Fig.1 GPR system

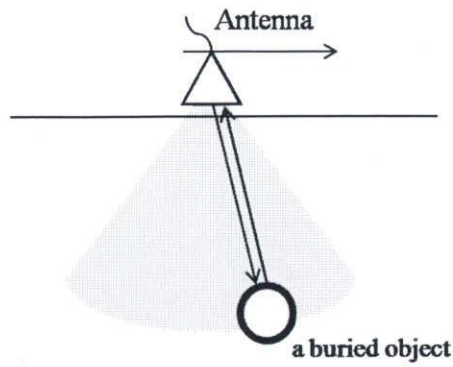
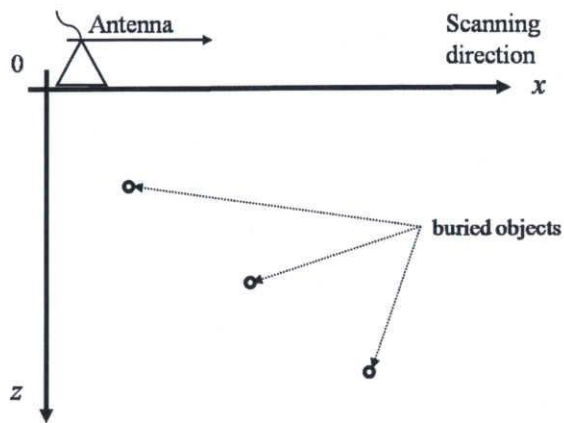
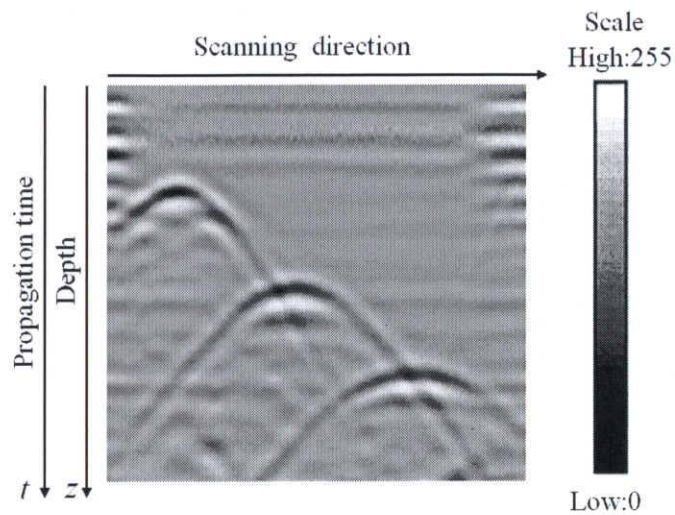


Fig.2 Reflection of electromagnetic wave



(a) Underground condition



(b) Scanning result

Fig.3 Scanning by GPR

2.1 アンテナの指向性

埋設物に対してアンテナを走査し、異なった地点からの信号を測定することによって多くの反射情報を集め、測定映像の復元を行う合成開口法を適用する場合、必然的にアンテナから斜めに放射される電磁波を利用することになる。このため、アンテナから放射される電磁波が、放射角度によってどのような特性（指向性）を持つか把握する必要がある。

そのため Fig.4 に示すようにアンテナの指向性の測定実験を行った。まず、送信アンテナを固定し、次に受信アンテナを送信アンテナから等距離となる同心円状の場所で電磁波を測定することにより、角度ごとの電磁波の強度を求め、Fig.5 の◆で示す。ここで、半波長アンテナと仮定すれば、指向性 $D(\theta)$ は、

$$D(\theta) = \cos\{(\pi/2)\sin\theta\} / \cos\theta \dots\dots\dots (3)$$

でモデル化することができる。ただし、 θ は送信アンテナと受信アンテナのなす角とする。このモデルによる計算結果を Fig.5 の実線で示す。これは先の実験結果◆によく一致しており、式(2)が適切であるといえる。アンテナの走査方向と指向性の関係は Fig.6 のように表される。

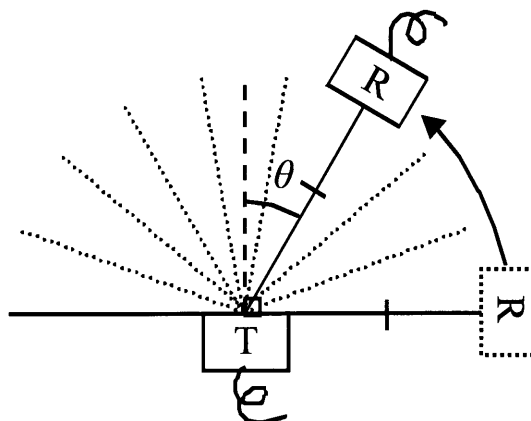


Fig.4 Illustration of measurement of directional characteristics

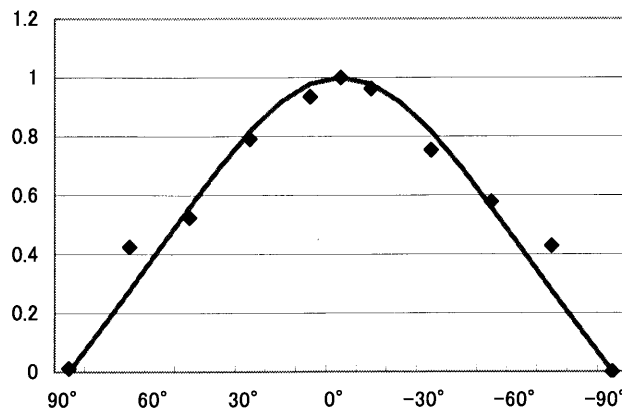


Fig.5 Directivity of antenna

第3章 合成開口法

合成開口処理は、点により散乱された信号（伝搬関数，点拡がり関数）を空間的に逆畳込み積分することにより像再生を行う手法である。つまり，地中レーダの観測映像を地中状況の映像に伝搬映像が掛かりぼやけたものだと考え，観測映像と伝搬映像のフーリエ像を割り合わせることにより地中状況の映像を復元する(Fig.7・8 参照)。

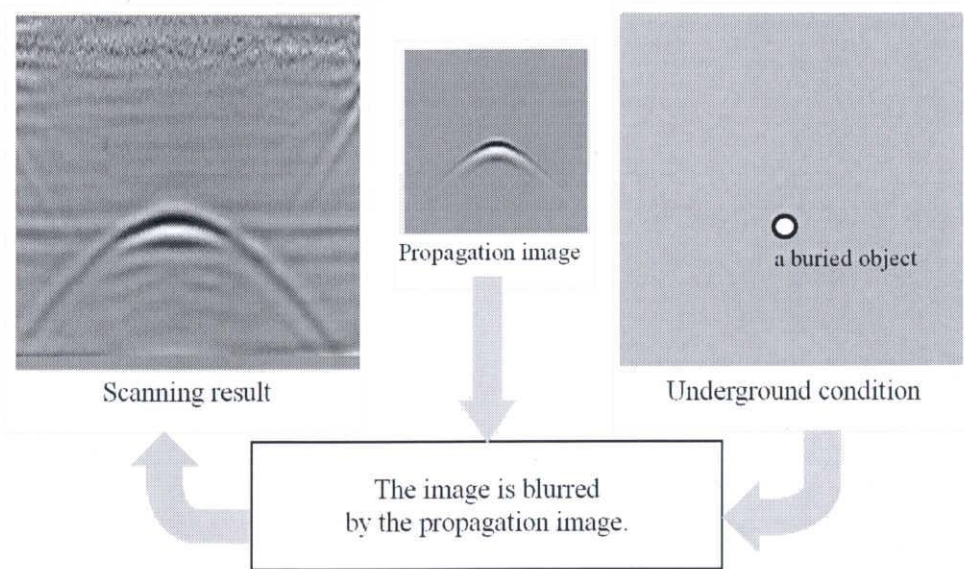


Fig.7 Scanning result by GPR system

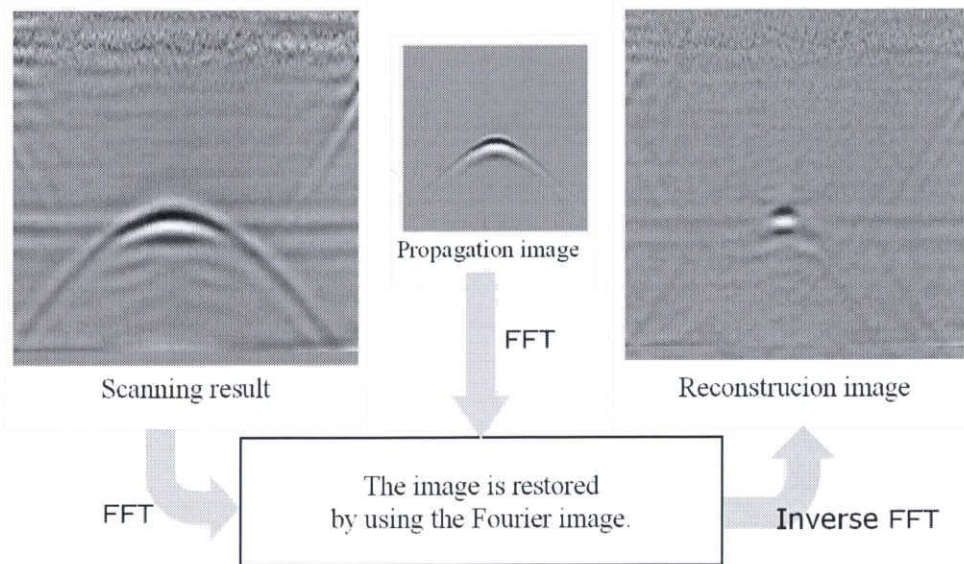


Fig.8 Reconstruction image by synthetic aperture method

計算を行う座標系は、Fig.9 に示すようにアンテナの走査方向を x 方向とした2次元 x - z 平面内とする。埋設物の反射関数を $g(x,z)$ とすると、地中レーダで計測される受信波信号 $f(x,z)$ は、

$$f(x, z) = \iint g(x', z') h_z(x-x', z-z') dx' dz' \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。ここで、 $h_z(x,z)$ は伝搬関数である。Fig.9 に示すように計測される受信波の骨格のパターンは、受信波の起源となる埋設物の深さ z' によって変化する。その骨格は、例えば、地表から最短の位置座標が (x', z') の埋設物からは、埋設物の大きさが深さに対して十分小さく、地中の電磁波伝搬速度が既知であるとするならば、同埋設物を頂点とする双曲線 z は、

$$z = ((x - x')^2 + z'^2)^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

で表される。これを考慮し、送信アンテナへの入力波を $u(z)$ (Fig.10 参照) とすると、伝搬関数 $h_z(x,z)$ は、

$$h_z(x, z) = u\{z - ((x - x')^2 + z'^2)^{1/2}\} D(\theta) \dots\dots\dots(6)$$

で示される。ただし、 $D(\theta)$ はアンテナの指向性、つまりアンテナと埋設物のなす角 θ による減衰を表す係数であり、式(3)で表される。アンテナと埋設物のなす θ は、

$$\theta = \tan^{-1}(x/z) \dots\dots\dots(7)$$

で表される (Fig.6 参照)。

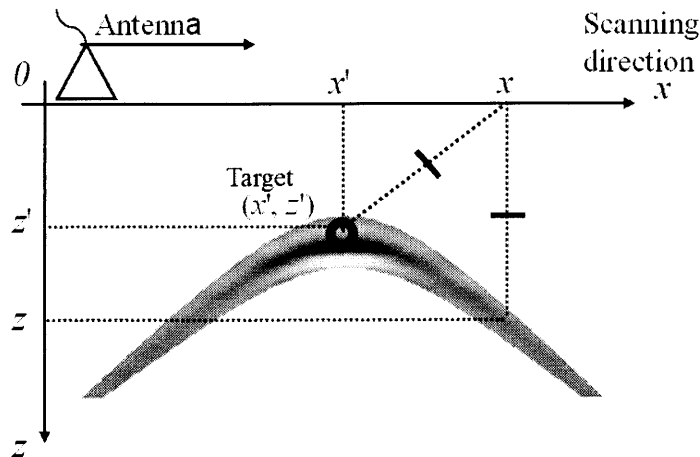


Fig.9 Coordinate systems for calculation

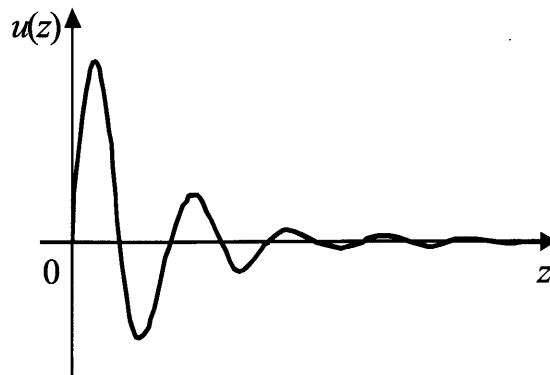


Fig.10 Input wave, $u(z)$

ここで、式(4)にフーリエ変換を行い、

$$F(\omega_x, \omega_z) = G(\omega_x, \omega_z)H_z'(\omega_x, \omega_z)$$

$$G(\omega_x, \omega_z) = F(\omega_x, \omega_z)H_z'^*(\omega_x, \omega_z)$$

のように、式変形する。ただし、 $H_z'^*(\omega_x, \omega_z)$ は $H_z'(\omega_x, \omega_z)$ の逆関数である。これを逆フーリエ変換することにより、反射関数 $g(x, z)$ は、

$$g(x, z) = \text{Fourier}^{-1}[F(\omega_x, \omega_z)H_z'^*(\omega_x, \omega_z)] \dots \dots \dots (8)$$

のように導かれ像再生を行うことができる。ただし、

$$F(\omega_x, \omega_z) = \text{Fourier}[f(x, z)]$$

$$H_z'(\omega_x, \omega_z) = \begin{cases} 1 & , |H_z'(\omega_x, \omega_z)| < r \\ \text{Fourier}[h(x, z)] & , |H_z'(\omega_x, \omega_z)| \geq r \end{cases}$$

$$H_z'^*(\omega_x, \omega_z) = 1/H_z'(\omega_x, \omega_z) \quad \text{for } \forall(\omega_x, \omega_z)$$

ここで、 r は伝搬関数の微小な値による悪影響を回避するための閾値である。本研究では、 $|H_z'(\omega_x, \omega_z)|$ の平均が概ね0.3であることを考慮し、 $r=0.3$ とした。

第4章 双曲線形状のもつ特徴を考慮した 合成開口処理

4.1 深さによる双曲線形状変化

4.1.1 深さによる双曲線形状変化を考慮した合成開口処理

地中レーダによって観測される双曲線形状は埋設物の深さによってたわみ具合が異なる (Fig.11(a)参照). 埋設物の深さが浅いほど双曲線形状のたわみ具合は急になり, 深いほどたわみ具合は緩やかになる. これを考慮するために, 深度のマルチセクタ処理による合成開口処理を行う.

深度のマルチセクタ処理とは, 地中レーダ測定映像の深さによる変化に着目している. すなわち, 深さによる双曲線形状変化の悪影響が出ないように, 双曲線形状の変化量により地下構造を区切り, 階層状のセクタを構成することにより, 形状変化を相殺する合成開口処理を行う手法である. 伝搬関数は, 深さ z に依存して連続的に変化するが, 計算量を減らすために, 特定の深さ範囲のセクタに対して同一の伝搬関数を用いる. セクタは, 「双曲線のたわみの変化量を均等にするよう N 分割する」という基準 (“均等たわみ基準” と呼ぶ) によって定める (Fig.11(b)参照). すなわち, まず, たわみの変化量を評価する x 座標を X , 最深セクタ, 第 N セクタの最深部の z 座標を Z_N とする (これらはいずれも指定値). 次に, 地表面 Z_0 のたわみと最深セクタ Z_N のたわみとの差を等分割した量を Δ とすると, 先の “均等たわみ基準” により, 第 n セクタの z 座標を Z_n は

$$(X^2 + Z_n^2)^{1/2} - Z_n = X - n\Delta \quad (\text{ただし } n=0, 1, 2, \dots, N) \dots\dots\dots(9)$$

により定式化できる. ここで,

$$\Delta = [X - \{(X^2 + Z_N^2)^{1/2} - Z_N\}] / N \dots\dots\dots(10)$$

である. この式(7)を Z_n について解くと,

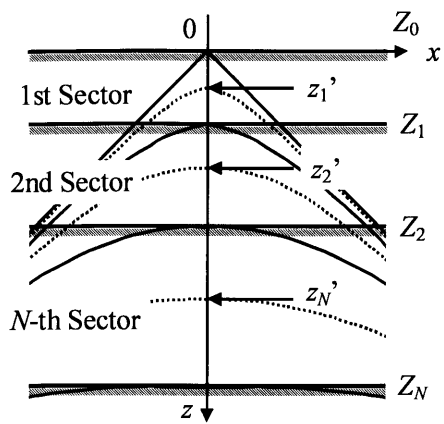
$$Z_n = \{x^2 - (X - n\Delta)^2\} / \{2(X - n\Delta)\} \dots\dots\dots(11)$$

が導かれる.

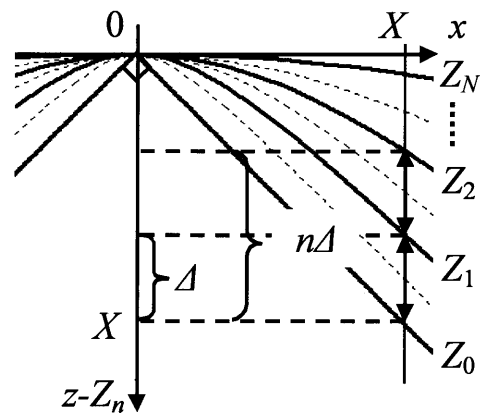
次に, 第 n セクタで用いる伝搬関数を与える代表深さ z_n' は, Z_{n-1} から Z_n までの深さの範囲で, 双曲線のたわみが中間になる深さとし, これは式(11)における n に $n-0.5$ を代入することにより,

$$z_n' = \{x^2 - (X - (n-0.5)\Delta)^2\} / \{2(X - (n-0.5)\Delta)\} \dots\dots\dots(12)$$

と導かれ, Fig.11 の点線のようになる. 各セクタに対して, セクタを代表する深さ z_n' に基づいて計算された伝搬関数を用いて式(8)により像再生を行うことで, 地中レーダ測定映像の深さによる変化を相殺した合成開口処理を行うことができる.



(a) Multi sectors and corresponding hyperbolas



(b) Bending patterns of hyperbolas

Fig.11 Multi sector structure

4.1.2 深さが異なる複数の埋設管に対する実験

深さが異なる複数の埋設管に対して、埋設管の深度を考慮しない合成開口処理（従来法）と埋設管の深度を考慮した処理（提案手法）を行い、両手法について比較検討する。

本実験では、埋設状況を作る媒質として水を用い、その中に対象物を設置した。これにより、媒質は一様とし、媒質中の電磁波伝搬速度が既知であるとした。Fig.12 に示すように、水中に直径 1.4cm の管を等間隔(10cm)で異なる深さに設置した条件のもとで、地中レーダにより探査を行った。地中レーダのサンプリング間隔は 0.25cm とした。従来法は 10cm の深さのみを前提として、伝搬関数を定めて処理を行った。これに対して、提案手法は地中レーダ測定映像を深さ方向に 10 分割し（セクタ数 $N=10$ ）、それぞれの深さで伝搬関数を定めることにより処理を行った。また、合成開口処理を $x=\pm 50\text{cm}$ の範囲で行うので、たわみの変化量を評価する x 座標、 X は 25cm とした。

Fig.13・14・15 に、測定結果と従来法と深度のマルチセクタ処理による合成開口法の処理結果を示す。Fig.14 に示すように従来法では、埋設管 A と比較的近い深さにある埋設管 E において受信波形が収束しているのに対し、埋設管 D 等においては双曲線形状が適していないため、受信波形が収束していないことが分かる。一方、Fig.15 に示す提案手法の結果では、全ての埋設管において、受信波形がそれぞれの位置に対応する一点によく収束していることが確認でき、提案手法が有効であることを示している。

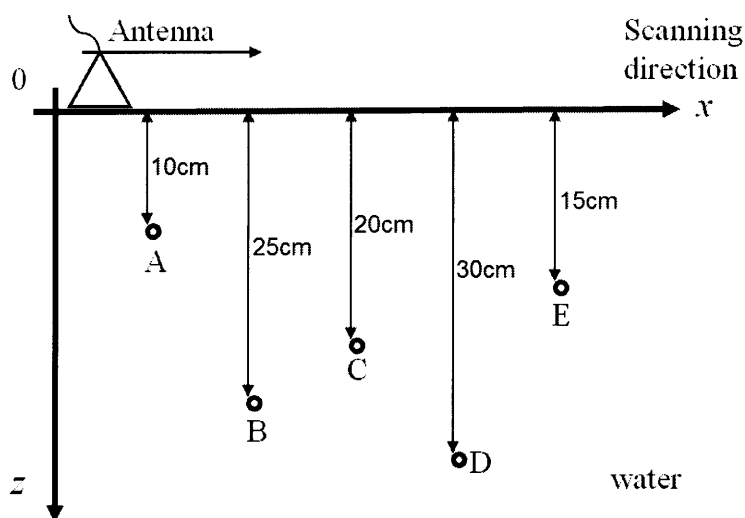


Fig.12 Experimental condition

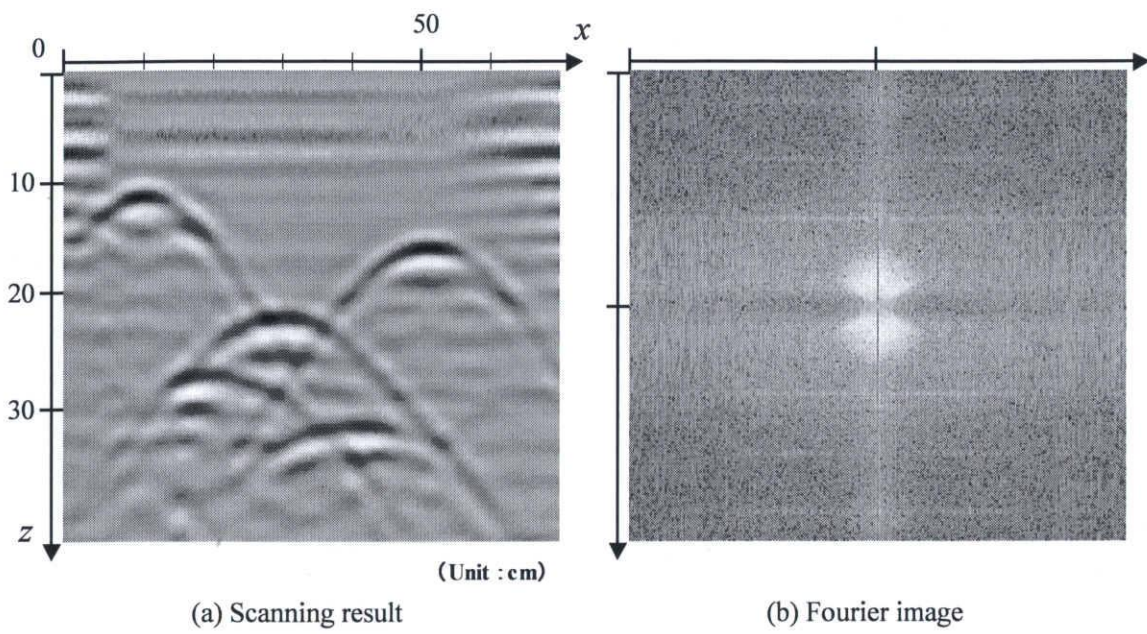


Fig.13 Scanning result

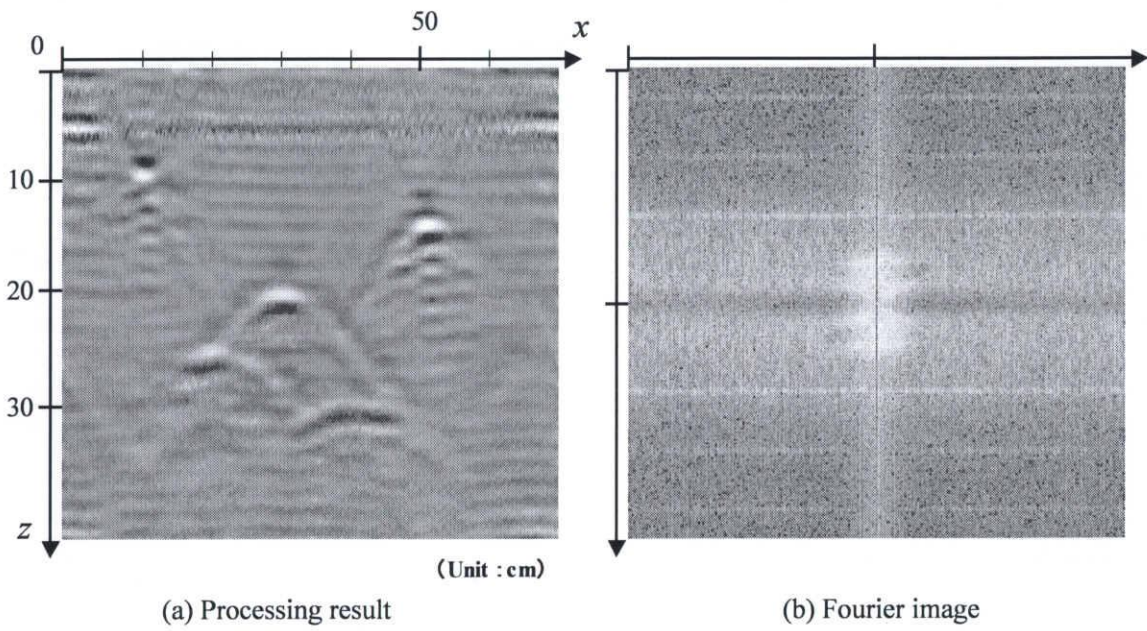
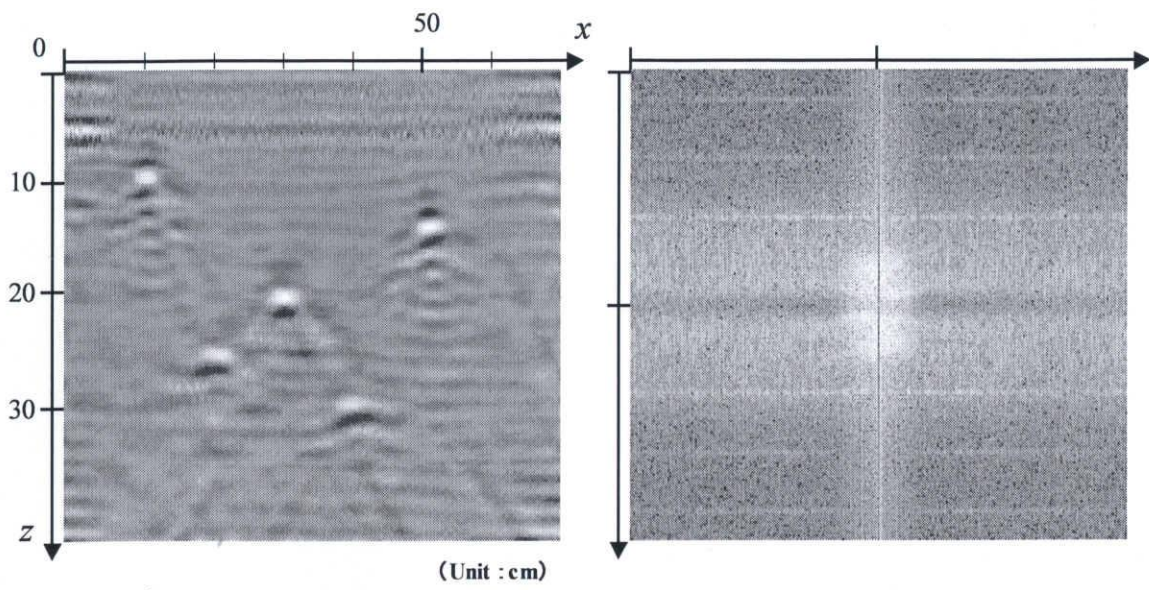


Fig.14 Conventional method



(a) Processing result

(b) Fourier image

Fig.15 Proposed method

4.2 埋設管径による双曲線形状変化

4.2.1 埋設管径による双曲線形状変化を考慮した合成開口処理

前節では埋設管の大きさが深さに対して十分小さいとして合成開口処理を行った。しかしながら、埋設管の大きさが深さに対して十分大きければ、地中レーダによって観測される双曲線形状は埋設された管の管径によって形状が異なる。これは、埋設管の直上以外の位置で地中レーダから放射された電磁波が埋設管の最上点の位置 (x', z') 以外のところで反射するためである。埋設管の大きさが深さに対して十分大きいとき、ある位置の地中レーダから放射された電磁波は地中レーダの放射位置から最短の埋設管表面で反射する (Fig.16 参照)。Fig.16 で示すように計測される受信波の骨格パターンは、例えば、埋設管の最上点の位置座標が (x', z') 、半径 R の埋設管からは、地中の電磁波伝搬速度が既知であるとすれば、同埋設物を頂点とする双曲線 z は式(5)より、

$$z = ((x - x')^2 + (z' + R)^2)^{1/2} - R \dots \dots \dots (13)$$

で表される。これを考慮し、送信アンテナへの入力波を $u(z)$ (Fig.6 参照) とすると、伝搬関数 $h_z(x, z)$ は式(6)より、

$$h_z(x, z) = u\{z - ((x - x')^2 + (z' + R)^2)^{1/2} - R\} D(\theta) \dots \dots \dots (14)$$

で示される。この埋設管径を考慮した伝搬関数を合成開口処理に用いることで、埋設管径による双曲線形状変化の悪影響が出ないように、形状変化を相殺する合成開口処理を行う。

本手法では、前節に述べたマルチセクタ処理を行う際、埋設管が存在する各セクタ毎に半径 R を変化させた合成開口処理を行い、最も画像が収束する R を見つけ出す。これにより埋設管径の推定とともに、合成開口処理画像の改善を行う。

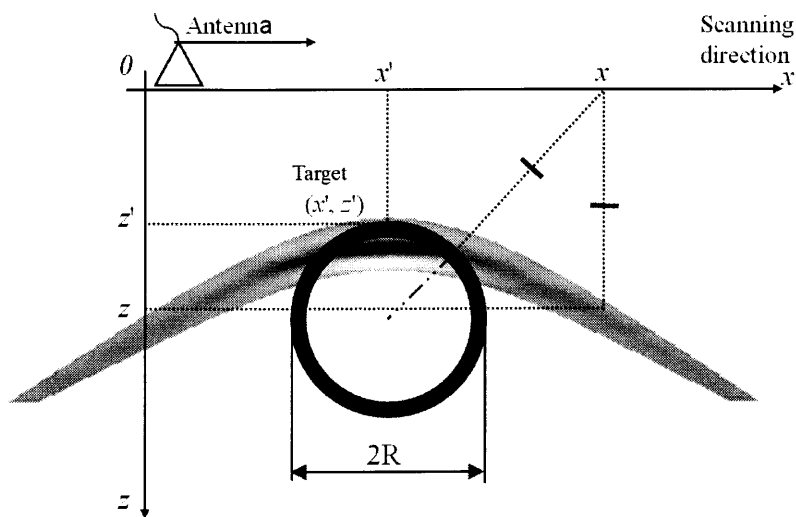


Fig.16 A hyperbola pattern of a large diameter pipe

4.2.2 埋設管径が異なる複数の埋設管に対する実験

埋設管径が異なる複数の埋設管に対して、埋設管の深度のみ考慮した合成開口処理（マルチセクタ処理）と埋設管の深度と埋設管径を考慮した処理（提案手法）を行い、両手法について比較検討する。

本実験では、埋設状況を作る媒質として水を用い、その中に対象物を設置した。これにより、媒質は一様とし、媒質中の電磁波伝搬速度が既知であるとした。Fig.17 に示すように、水中に異なる管径の管を等間隔(20cm)で異なる深さに設置した条件のもとで、地中レーダにより探査を行った。地中レーダのサンプリング間隔は 0.25cm とした。マルチセクタ処理の条件として、地中レーダ測定映像を深さ方向に 10 分割し（セクタ数 $N=10$ ）、それぞれの深さで伝搬関数を定め、たわみの変化量を評価する x 座標、 X は 25cm とした。提案手法では、埋設管の半径を 0.5cm から 6.5cm まで 0.1cm 間隔で変化させた合成開口処理を行い、最も画像が収束した値を半径 R として推定した。

Fig.18・19・20 に、測定結果と従来のマルチセクタ処理と埋設管の深度と埋設管径を考慮した処理（提案手法）の処理結果を示す。Fig.19 に示すように従来のマルチセクタ処理では、埋設管 B、C の収束結果が埋設管 A に比べて良くない。これは合成開口処理によって埋設管上部の一部の形が復元されたもので、埋設管の大きさを示している。しかし、これでは埋設管の大きさは熟練した技術者にしかわからない。一方、Fig.20 に示す提案手法の結果では、埋設管 B、C の収束結果が従来のマルチセクタ処理よりも良くなっている。これにより、見た目では埋設管の大きさの情報が無くなり他の埋設管と大きさの区別はできないが、収束結果より埋設管 A、B、C の管径、 $2R_A=1.4\text{cm}$ 、 $2R_B=11.8\text{cm}$ 、 $2R_C=7.4\text{cm}$ が推定できる。

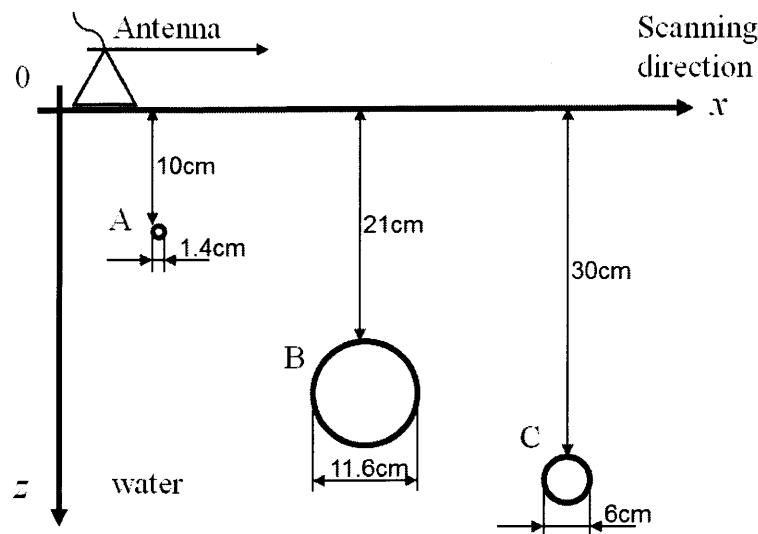
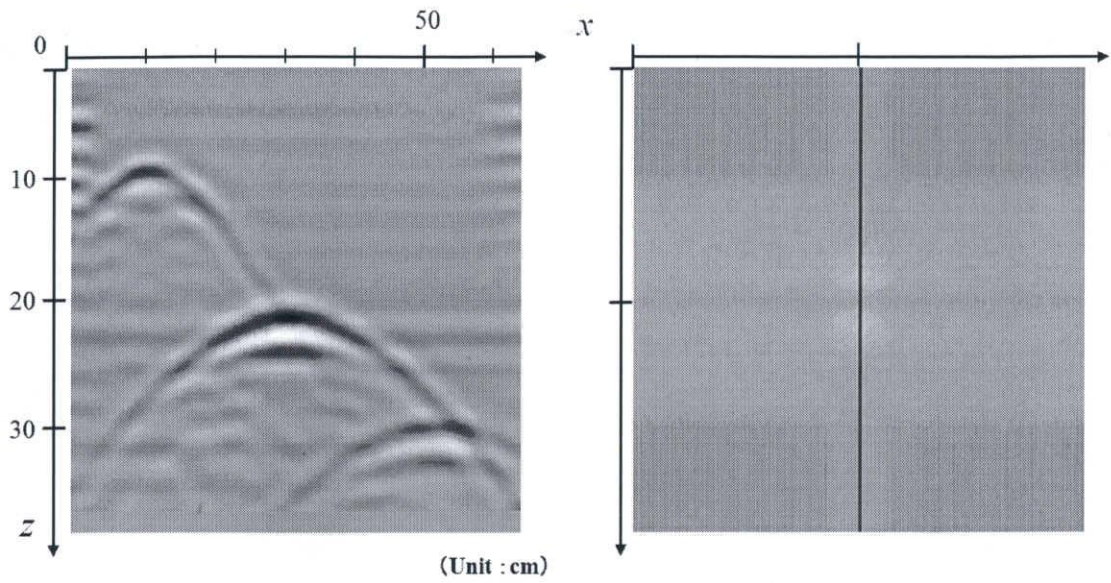


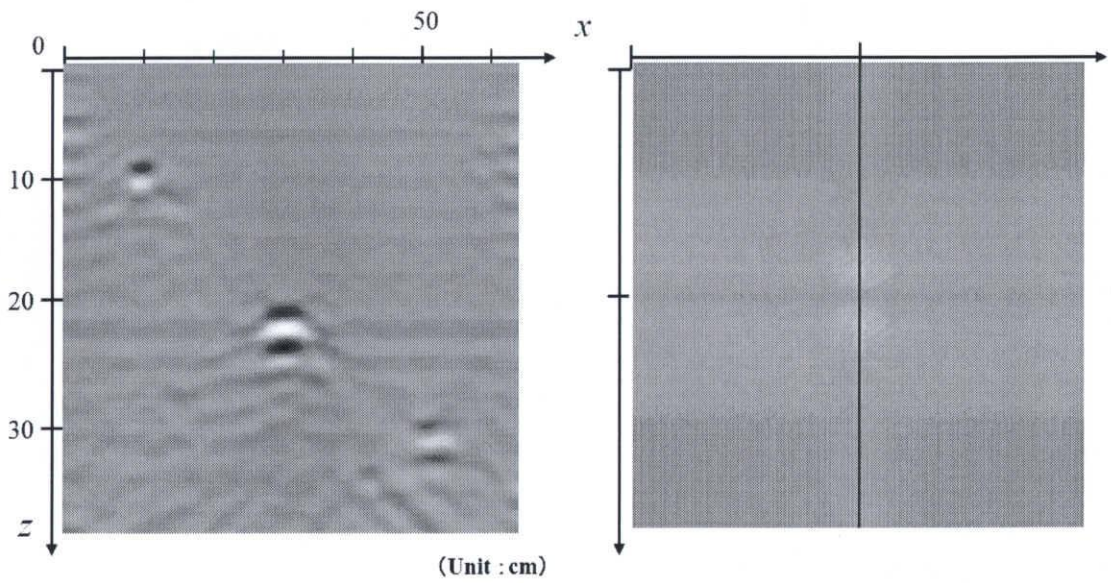
Fig.17 Experimental condition



(a) Scanning result

(b) Fourier image

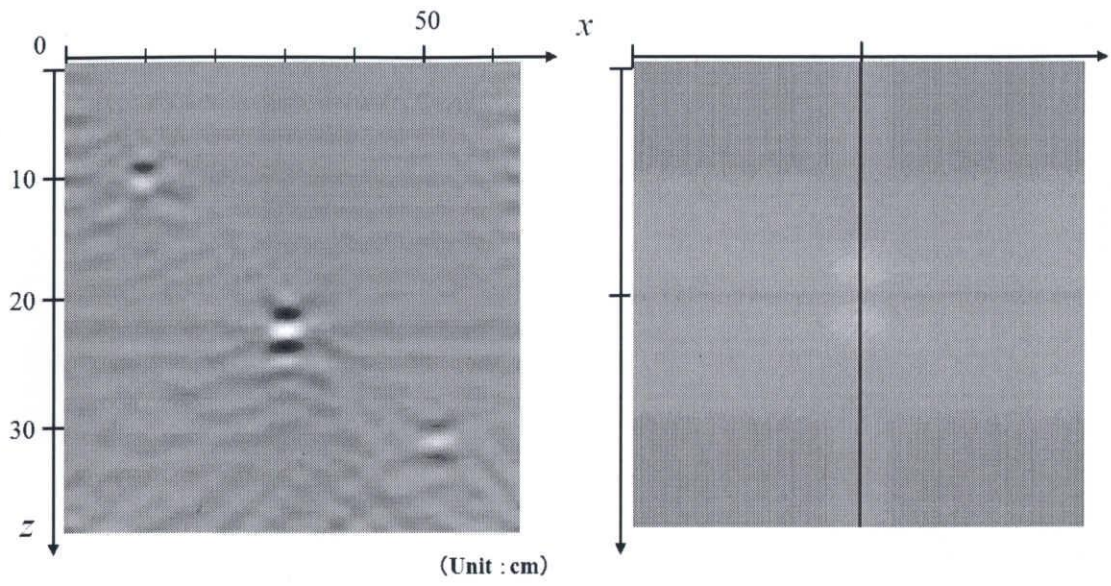
Fig.18 Scanning result



(a) Processing result

(b) Fourier image

Fig.19 Conventional method



(a) Processing result

(b) Fourier image

Fig.20 Proposed method

4.3 埋設状況の媒質による双曲線形状変化

4.3.1 埋設状況の媒質による双曲線形状変化を考慮した合成開口処理

地中レーダによって観測される双曲線形状は埋設状況の比誘電率（地中の電磁波伝搬速度）によってたわみ具合が異なる。これは、地中レーダから放射された電磁波が埋設管で反射してくるまでの伝搬時間 t が埋設状況の比誘電率に依存しているためである(式(1),(2)参照)。Fig.21 で示すように計測される観測映像において、埋設状況の比誘電率が大きい（電磁波伝搬速度が遅い）ほど双曲線形状のたわみ具合は急になり、比誘電率が小さい（電磁波伝搬速度が速い）ほど双曲線形状のたわみ具合は緩やかになる。

これまでの合成開口処理では、埋設状況の媒質特徴である比誘電率が既知であるとして扱ってきた。しかしながら、実環境において比誘電率は未知あり、また不均一であることも多く、埋設状況の比誘電率を知るには予備実験が必要となる。本節においては埋設状況の比誘電率を未知のまま扱い、合成開口処理を用いて比誘電率を推定する手法を提案する。

計算をする座標系は深度座標軸 z が埋設状況の比誘電率に依存しているため、これまでの2次元 $x-z$ 平面ではなく、伝搬時間 t を用いた2次元 $x-t$ 平面内とする。そのため、式(4)～(6)を式(1)により $x-t$ 平面内の関数に変換し、埋設物の反射関数 $g(x, t)$ 、地中レーダで計測される受信波信号 $f(x, t)$ 、伝搬関数 $h_t(x, t)$ として合成開口処理を行う。観測した埋設状況の比誘電率と、合成開口処理で用いた比誘電率が同一であるならば、処理結果画像の埋設管存在位置での収束は最も良くなる。

本手法では、マルチセクタ処理を行う際、埋設状況の比誘電率を未知として扱い、埋設管が存在する各セクタ毎に埋設状況の比誘電率 ϵ を変化させた合成開口処理を行い、最も画像が収束する ϵ を見つけ出す。このときの比誘電率を用いて埋設管の深度推定とともに、合成開口処理画像の改善を行う。

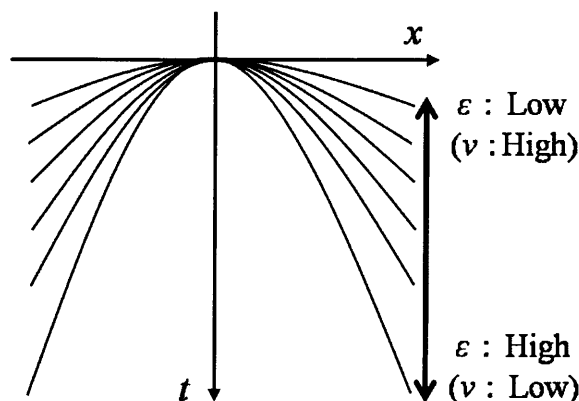


Fig.21 Relation of relative permittivity and hyperbola pattern

4.3.2 土媒質中の複数の埋設管に対する実験

埋設状況の比誘電率が未知であり、深さの異なる複数の埋設管に対して、埋設管の深度と埋設状況の比誘電率を考慮した処理（提案手法）を行い、その有効性を検討する。

本実験では、埋設状況を作る媒質として土を用い、その中に対象物を設置した。これにより、媒質は埋設状況の比誘電率は未知とし、埋設管径は既知であるとした。Fig.22 に示すように、土媒質中に直径 10cm の管を等間隔(1.5cm)で異なる深さに設置した条件のもとで、地中レーダにより探査を行った。地中レーダのサンプリング間隔は 2cm とした。マルチセクタ処理の条件として、地中レーダ測定映像を深さ方向に 10 分割し（セクタ数 $N=10$ ）、それぞれの深さで伝搬関数を定め、たわみの変化量を評価する x 座標、 X は 2m とした。提案手法では、埋設管が存在する各セクタ毎に埋設状況の比誘電率を乾燥土のとりうる値 $\epsilon=4.0 \sim 10.0$ で 0.1 間隔で変化させた合成開口処理を行い、最も画像が収束した値をそのセクタの埋設状況の比誘電率 ϵ として推定した。このときの比誘電率を用いて埋設管の深度推定をする。

Fig.23・24 に、測定結果と埋設管の深度と埋設状況の比誘電率を考慮した処理（提案手法）の処理結果を示す。従来のマルチセクタ処理では、埋設状況の比誘電率が未知である場合は処理が行なえないが、Fig.24 に示すように提案手法では、全ての埋設管において良く収束した結果が得られた。さらに、埋設管 A,B,C の存在する各セクタで推定された比誘電率 ϵ と、それを用いて推定した埋設管の深度 z はそれぞれ、 $\epsilon_A=6.7$, $z_A=1.28\text{m}$, $\epsilon_B=7.9$, $z_B=1.46\text{m}$, $\epsilon_C=7.9$, $z_C=1.66\text{m}$ が得られた。本手法では、各セクタで異なる比誘電率を推定できることから、土媒質が不均一な状況や、地層などにより比誘電率が深さによって異なる実環境においても提案手法が有効であることを示す。

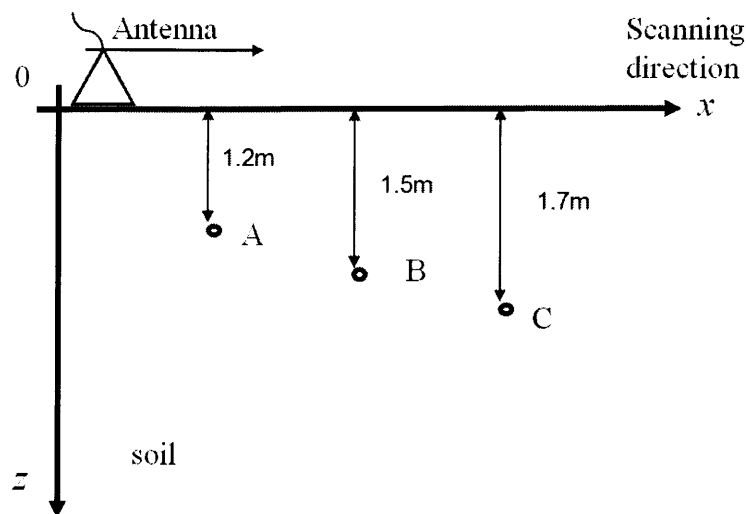
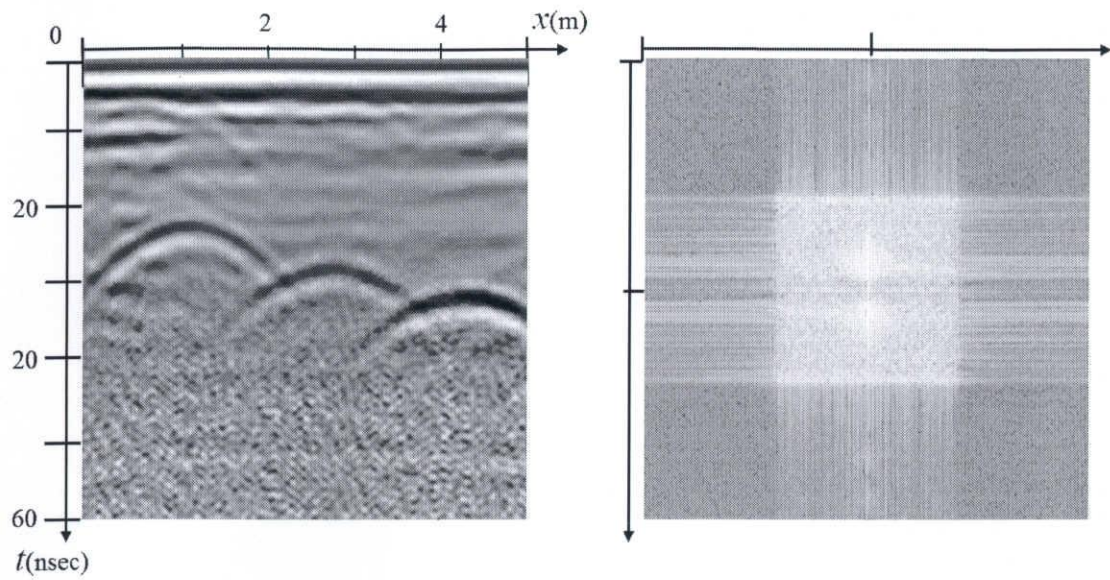


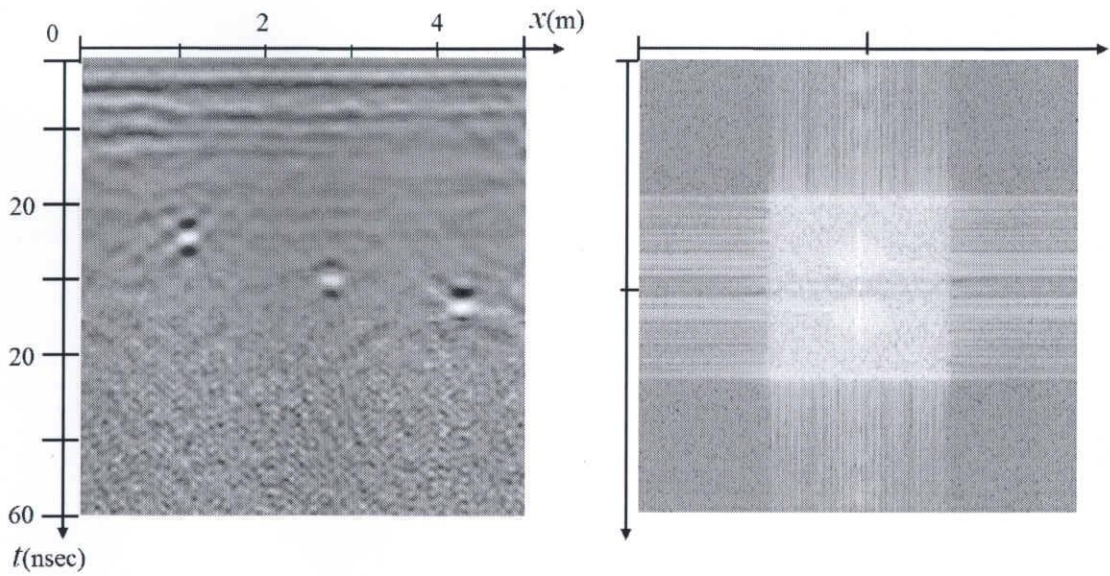
Fig.22 Experimental condition



(a) Scanning result

(b) Fourier image

Fig.23 Scanning result



(a) Processing result

(b) Fourier image

Fig.24 Proposed method

第5章 むすび

本研究では，地中レーダで計測される受信波形の双曲線形状が埋設物の深さ，形状，埋設状況の比誘電率（地中の電磁波伝搬速度）により変化するという特性によって，合成開口映像の品質が劣化することに注目した．合成開口処理において，埋設物の深さ，形状，埋設状況の比誘電率を考慮した点拡がり関数を用い，それぞれの特徴を相殺する合成開口処理を行う地下イメージング手法を提案した．そして，処理結果から，地下構造の実体をよりの確に表す映像の復元，埋設管径の推定，埋設状況の比誘電率の推定ができ，提案手法が有効であることを確認した．

今後の課題として，管形以外の埋設物の形状推定，イメージング結果や埋設物の比誘電率の特性を用いた材質の違いを識別することなどが挙げられる．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始熱心に御指導、御討論して頂いた野村由司彦教授に深く感謝いたします。また、研究を行う上で数多くの貴重なアドバイスや実験環境の準備にご尽力頂いたアイレック技建(株)の須藤佳一氏に深く感謝いたします。そして、研究を遂行するにあたりご協力してくださいましたメカトロニクス研究室諸氏に心から御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 馬場進, 菊池真人, 有岡良祐: 電磁波による鉄筋コンクリート舗装下の空洞探査, 第13回非開削技術研究発表会論文集, pp.15-18 (2002)
- [2] 佐藤源之: 地中レーダによる地下イメージング, 信学論(C), Vol.J85-C, No.7, pp520-530 (2002)
- [3] 田中俊幸, 千代田秀之, 竹中隆: 合成開口処理とトモグラフィ法を併用した地下探査, 信学技報 SANE, Vol.101, No.341, pp.15-21 (2001)
- [4] 柴田耕志, 谷口向覚, 川村琢也, 斎藤保典, 野村彰夫: CW レーダによる地中埋設物体のイメージング, 信学論, B-II, Vol.79-B-II, No.9, pp589-599 (1996)
- [5] T.Moriyama, M.Nakamura, Y.Yamaguchi, H.Yamada, W.-M.Boerner: Classification of Target Buried in the Underground by Radar Polarimetry, IEICE TRANS.COMMUN., Vol.E82-B, No.6, pp.951-957, June (1999)
- [6] T.Moriyama, Y.Yamaguchi, H.Yamada: Three-Dimensional Fully Polarimetric Imaging in Snowpack by a Synthetic Aperture FM-CW Radar, IEICE TRANS.COMMUN., Vol.E83-B, No.9, pp.1963-1968, September (2000)
- [7] M.Okada, T.Kaneko, T.Miura: Underground Pipe Signal Extraction Using LoG Filter from Pulse Radar Images, IEICE TRANS. INF. & SYST., Vol.E83-D, No.1, pp.112-115, January (2000)
- [8] T.Kaneko: Radar Image Processing for Locating Underground Linear Objects, IEICE TRANSACTIONS, Vol.E74, No.10, pp.3451-3458, October (1991)
- [9] 綱崎勝, 光本浩士, 小南昌信: 地中レーダ画像からの楕円推定による埋設管の口径推定, 信学技報 SANE, Vol.103, No.300, pp.1-6 (2003)
- [10] 西岡泰弘, 藤井和也, 宇野亨, 何一偉: 地中探査における埋設物イメージング法の比較, 信学技報 SANE, Vol.97, No.378, pp.23-29 (1997)
- [11] 宮本潤哉, 宇野亨: 地中レーダにおける埋設物イメージング法の比較, 信学技報 A・P, Vol.100, No.292, pp.45-50 (2000)
- [12] K.Nagamune, K.Taniguchi, S.Kobashi, Y.Hata: Automated Extraction System of Embedded Tubes from Pulse Radar Image Based on Fuzzy Expert System, IEICE TRANS. FUNDAMENTALS, Vol.E86-A, No.7, pp.1778-1789 (2003)
- [13] 西本昌彦, 下憲一郎: Hidden Markov Model を用いたレーダ信号処理法とその地中埋設物探査への応用, 信学技報 SANE, Vol.103, No.300, pp.53-57 (2003)