

地中レーダによる比誘電率と
埋設管半径の同時推定

平成 20 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

小 瀧 裕 史

複写可

修士論文

地中レーダによる比誘電率と
埋設管半径の同時推定

指導教員 野村 由司彦 教授

平成 20 年度

三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

407M122 小瀧 裕史



平成 20 年度修士論文

地中レーダによる比誘電率と
埋設管半径の同時推定

専攻 三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
研究室 メカトロニクス研究室

平成 19 年度入学 407M122

氏名 小瀧 裕史

Copyright © 2009, Hirofumi KOTAKI.

Mechatronics Laboratory

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Engineering, Mie University.

概要

本論文では、地中レーダによる観測画像からの埋設管半径と比誘電率の同時推定手法を提案する。本論文の第一の特徴は、地中に送信したパルス波の埋設管からの反射波について、伝搬時間の情報だけでなく、観測強度についてもモデル化することで、これらを情報として利用可能とした点である。しかし、埋設管からの反射強度は、管半径や材質などによって決まる散乱断面積に依存するため、モデル化が困難であった。そこで、本論文の第二の特徴として、埋設管直上における最大振幅で正規化した観測強度分布を用いることによって、この問題を解決する。無損失性と見なすことができる乾土において埋設管の探査実験を行った結果、管半径と比誘電率を同時推定できることを示す。また、本手法における各未知パラメータの推定精度についても議論する。

キーワード 地中レーダ, 伝搬時間, 観測強度, 管半径推定, 比誘電率推定, 誤差解析

Abstract

In this paper, we proposed a simultaneous estimation method of relative permittivity and pipe radius by GPR. This method uses the information of propagation time and observed intensity from buried pipes. However, formulating the observed intensity is difficult due to various unknown factors; the observed intensity depends on the scattering-cross section that is defined such as the pipe's radius and material. formulating the observed intensity is difficult due to various unknown factors; the observed intensity depends on the scattering-cross section that is defined a radius and a material of a buried pipe. Therefore, we proposed a technique to avoid the ill-effects of the various unknown factors by introducing the relative values of the observed intensities. They are normalized by the maximum intensity, that is assumed to be observed directly above the buried pipe. Experimental results demonstrated the effectiveness of the proposed algorithm. Then the estimation accuracy was examined for the proposed method.

Keywords ground penetrating radar, propagation time, observed intensity, pipe radius estimation, relative permittivity estimation, error analysis

目次

第 1 章	諸論	1
第 2 章	地中レーダの概要	3
2.1	地中レーダの原理	3
第 3 章	地中レーダによる観測画像からの埋設管半径の推定とその誤差解析	6
3.1	概要	6
3.2	提案手法	7
3.3	管半径推定の誤差解析	9
3.4	偶然誤差と系統誤差の誤差解析	11
3.5	埋設物の探査実験	13
3.6	むすび	17
第 4 章	地中レーダによる比誘電率と埋設管半径の同時推定	18
4.1	概要	18
4.2	提案手法	19
4.3	推定手法	23
4.4	実験	24
4.5	むすび	31
第 5 章	結論	34
5.1	本論文の総括	34
5.2	今後の課題	34
	参考文献	36
	謝辞	39
付録 A	各未知パラメータの誤差の検討	40

目次

2.1	Ground penetrating radar (GPR) system.	3
2.2	The characteristics model for the electromagnetic wave emission.	5
3.1	Condition of buried pipe.	7
3.2	Transmitting wave and the reflected wave from buried object.	8
3.3	Pseudo-hyperbolic pattern extracted from the propagation time of electromagnetic wave.	8
3.4	Errors propagated from the measurement error of propagation time and the setting error of relative permittivity.	12
3.5	Experimental setup.	14
3.6	Underground cross-section drawing of experimental field.	14
3.7	Scanned image by GPR.	14
3.8	Peak extraction from GPR scanned image.	15
3.9	Pseudo-hyperbolic fitting by nonlinear least-squares method.	15
3.10	Comparison of approximate solutions and experimental values for multiple buried pipes.	16
3.11	Comparison of approximate solutions and experimental values for wide range of θ_n	16
4.1	Scattered wave from buried pipe.	19
4.2	Observed value of propagation time and reflected intensity.	20
4.3	Distribution of evaluated value of propagation time and relative intensity.	21
4.4	Contour map of evaluated value with propagation time.	22
4.5	Distribution of evaluation value $S(\boldsymbol{x})$ to pipe radius and relative permittivity.	22
4.6	Experimental setup to calibrate directional characteristics of the GPR.	24
4.7	Experimental result of directional characteristics of the GPR.	25
4.8	Experimental setup to calibrate attenuation by propagation distance.	25
4.9	Experimental result of attenuation by propagation distance.	25
4.10	Experimental setup.	26

4.11	Comparison of relative observed intensities for the various buried pipe lengths.	26
4.12	Underground cross-sectional drawing of experimental field.	27
4.13	Scanned image by GPR.	27
4.14	Elimination of direct wave.	27
4.15	Underground cross-sectional drawing of two-layer medium experimental field.	30
4.16	Scanned image for the two-layer medium.	30
4.17	Elimination of direct wave.	30
4.18	Observed value and fitted curve of propagation time.	31
4.19	Observed value and fitted curve of reflected intensity.	31
4.20	Observed value and fitted curve of propagation time.	32
4.21	Observed value and fitted curve of reflected intensity.	33
A.1	Relationship between theoretical variance of each parameters and semi-synthetic aperture angle θ_n	41

表目次

3.1	parameter values for simulation.	10
3.2	Estimated results by proposed method.	15
4.1	Estimated results by proposed method.	28
4.2	Unknown parameter estimation-errors propagated from measurement errors.	29

第1章

諸論

都市部の地下は、水道管、ガス管、通信ケーブル等の設備が、複雑に入り乱れて埋設されている。これらは敷設時の施工図面が不正確であったり、埋め戻し時に埋設位置がずれる場合も多く、地下埋設状況は必ずしも正確に把握できていない [1]。それゆえ、道路工事等で掘削したとき、埋設管やケーブル等のライフラインを傷つけてしまい、市民の生活に甚大な被害をもたらす危険性がある [2]。

ゆえに、掘削に先立ち地下構造を知ることは、安全性確保の点からも重要な課題である。そこで、埋設物・空洞などの複雑な地下構造を、非破壊・非掘削でイメージングすることができる地中レーダ (Ground Penetrating Radar:GPR) が幅広く活用されている [3]。しかし、地中レーダの観測画像は、媒質や不要散乱物等からの影響が大きい上に、地下構造物の形状や材質を直接的に表すものではないので、目標物を見つけるには熟練者の経験や知識に頼らなければならない。そのような経験や知識に依存することなく、地中レーダの観測画像から地下埋設状況を把握するには大きく分けて

(1) 観測画像に含まれるノイズ除去や空間分解能の向上による画像の強調

(2) 観測画像からの対象物の認識

の2つが必要となる [4]。(1)を目的とした手法として、例えば、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法を、ボアホールレーダ計測に適用する手法が提案されている [5, 6]。また、衛星・航空機などに搭載されている合成開口処理や、弾性波計測の分野で用いられているマイグレーション法を地中レーダに適用した結果、その有効性が報告されている [7, 8]。

(2)を目的とした手法として、例えば、田中らによって相互相関包絡線法が提案されている。この手法は、理論的な反射波形と観測された反射波形との一致度として二乗誤差で定義されるモデル適応度が、埋設管までの伝搬時間時刻で頂点が現れる単峰な関数になることを利用する。それにより、埋設管までの正確な伝搬時間を求めることで、埋設位置、比誘電率の推定や、同定した反射位相からの埋設物の材質弁別を実現している [9, 10]。

本論文では、(2)の分類にあたる観測画像からの対象物の認識を目的とする。観測画像から、埋設管の管半径や材質、埋設位置等が分かれば、対象となる埋設管を把握するのに有効であると考えられる。以下に各章に分けて、本論文の構成を述べる。

第2章 地中レーダの概要では、地中レーダの原理について説明したのち、基礎的な電磁波の土中の伝搬特性について述べる。

第3章 地中レーダによる観測画像からの埋設管半径の推定とその誤差解析では、伝搬時間の情報から管半径と埋設位置を解析的に推定する手法を提案する。さらに伝搬時間の計測誤差と比誘電率の設定誤差を管半径推定値に対する誤差要因として捉え、本手法に伴う誤差特性を明らかにする。

第4章 伝搬時間と反射強度の情報を利用した管半径と比誘電率の同時推定では、伝搬時間だけでなく、埋設管からの反射強度をモデル化し、利用することで、今まで困難であった管半径と比誘電率の同時推定手法を提案する。

第5章 結論では、提案手法の有効性についてまとめたのち、研究結果の総括と将来への展望について述べる。

第2章

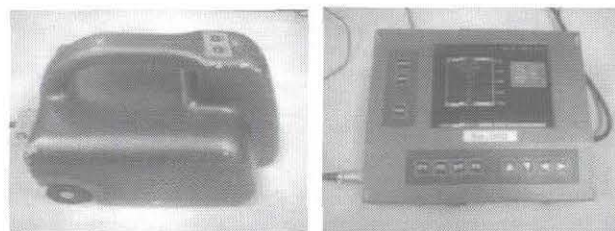
地中レーダの概要

2.1 地中レーダの原理

Fig.2.1 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（株））を示す。パルス状の印加電圧のパルス幅は約 1nsec，電磁波の中心周波数は 700MHz である。Fig.2.1(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。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。放射された電磁波は地中を伝搬し，誘電率が異なる物体の境界で反射する。その反射波を受信アンテナで受信することにより，電磁波が埋設物から反射するまでの伝搬時間 y_T を求めることができる。電磁波の伝搬時間 y_T は，

$$l = \frac{cy_T}{2} = \frac{c_0 y_T}{2\sqrt{\epsilon}} \quad (2.1)$$

を用いて，アンテナユニットから埋設物までの距離 l に変換できる。ここで c は電磁波の地中伝搬速度， c_0 は真空中における光速 ($c_0 = 3.0 \times 10^8$ m/s)， ϵ は地中の比誘電率である。Fig.2.1(b) に示す処理装置によって，観測点毎に得られた観測波形を並べ，振幅値の大きさごとに色段階的な擬似カラー表示などで，地中断面の観測画像が表示される。観測画像において，横軸はアンテナユニットの走査位置，縦軸は電磁波の伝搬時間である。アンテナから放射された電磁波は，ある指向特性を持ちながら広角度に放射される。したがって，指向特性の範



(a) Antenna unit

(b) Processing unit

Fig.2.1. Ground penetrating radar (GPR) system.

囲ではアンテナを移動しても、同一物体からの反射波を受信する。その結果、埋設物が大きさのない点状の対象の場合、反射像は双曲線形状を呈する。埋設物が大きさを有する、管のような場合には、双曲線とは若干異なる擬似双曲線となる。

2.1.1 電磁波の土中伝搬特性

Fig.2.2 に示すように、極座標系 (l, θ) の原点にアンテナが設置されている条件を考える。このとき、Y 軸を中心として円筒状に広がって伝搬する電磁波を対象として、地中伝搬特性を定式化する。大地の電気的特性は誘電率 ε_1 、透磁率 μ_1 、導電率 σ_1 で特徴付けることができる。このとき、媒質中における電磁波が距離 l だけ伝搬したとき、点 $p(l, \theta)$ における電界 $E(l, \theta)$ は

$$E(l, \theta) = E_0 \cdot D_e(\theta) \cdot \frac{e^{-\gamma l}}{l} \quad (2.2)$$

と表される。ここで、 E_0 は送信源における電界強度、 $D_e(\theta)$ は送信機の指向特性、 γ は伝搬定数を表す。このとき、減衰定数、位相定数をそれぞれ α 、 β とすれば、伝搬定数 γ は、

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.3)$$

と表すことができる。ただし、

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right)^2} - 1 \right) \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \right)^2} + 1 \right) \right\}^{1/2} \quad (2.5)$$

である。ここで ω は、電磁波の角周波数を表す。本研究で用いるような地中レーダでは周波数が十分に高く、 $(\sigma_1/\omega\varepsilon_1)^2 \ll 1$ が成り立つので、

$$\alpha = \frac{\sigma_1}{2} \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}} \quad (2.6)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\varepsilon} \quad (2.7)$$

と近似することができる。

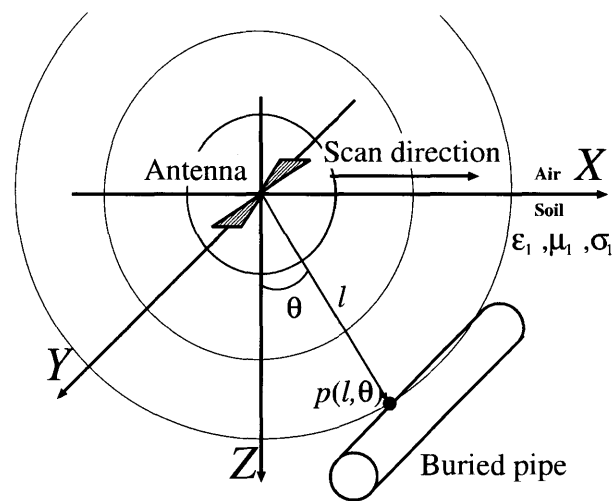


Fig.2.2. The characteristics model for the electromagnetic wave emission.

第3章

地中レーダによる観測画像からの埋設管半径の推定とその誤差解析

3.1 概要

地中レーダから得られる情報のうち、主要なものは、送受信に要する埋設管までの伝搬時間と反射波の強度である。特に、伝搬時間は管の材質に依存せず、幾何学的な関係のみによりモデル化できて利用しやすいこともあり、多くの研究がなされている。しかし、地表面走査型の地中レーダの場合、伝搬時間の情報からだけでは、管半径と比誘電率には強い相関があるため、両者の同時推定は困難であることが知られている [21, 22]。そこで、伝搬時間の情報だけを用いる多くの従来研究では、管半径か比誘電率のうち、一方を既知として他方を推定することで、この強相関問題を回避してきた。例えば、管半径を既知として扱い、伝搬時間の情報から土中の比誘電率を総当たりの求め手法が提案されている [11, 12, 13]。これらの手法は、いずれも比誘電率と埋設位置の関数として評価値を設定し、総当たり法を用いて、その評価値が最大となるときの比誘電率と埋設位置を求める手法である。本論文では、これらとは逆に比誘電率を既知として、管半径と埋設位置を解析的に同時推定する手法を提案する。非線形最小二乗法を用いることで、より効率的に管半径、埋設位置を推定することが可能となる。さらに伝搬時間の計測誤差と比誘電率の設定誤差を管半径推定値に対する誤差要因として捉え、本手法に伴う誤差特性を明らかにする。ただし、地中の比誘電率は深さによらず一定で既知のものとして扱う。本手法で地中の比誘電率を既知とするのは、地中レーダによる観測画像からの画像処理だけでは管半径と比誘電率の同時推定は困難なためである。しかし、例えば対象付近に下水人孔が存在すれば、蓋を開け、下水管路の埋設深さを直接測定することで、埋設管までの伝搬時間と合わせ、土中の比誘電率を求めることができる。また、それ以外にも、例えばダイポールアンテナを用いた土壌の媒質定数推定手法などが提案されており [14]、これらの手法を併用することで、地中の比誘電率はある程度把握することが可能である。また仮に、比誘電率が特定できなくとも、本手法により、受信波形から複数の埋設管について、管半径、埋設深さの相対値は知ることができる。相対値であっても、施工図面と照らし合わせることで、有益な情報となる。なお、前提条件として、土中は均質で等方性かつ分散がないものとしている。ま

た、簡単化のため、アンテナは埋設管に対して垂直な方向に走査するものと仮定し、アンテナの形状は、送・受信アンテナが同一点にあるとするモノスタティック配置と見なして定式化する。ただし、埋設管に垂直な走査方向は、埋設管直上付近でアンテナを回転させれば、反射波形の振幅が最大になるときの方向として得ることができ、またモノスタティックでない場合も、幾何学的形状を考えれば、同様に定式化できる。最後に、提案手法の有効性を確認するため、大きさの異なる複数の埋設管の探査実験を行い、管半径が推定できることを示す。

3.2 提案手法

3.2.1 伝搬時間のモデル式

半径 r の埋設管が、水平位置 l_u 、埋設深さ l_d の位置に埋設されているときの断面の様子を Fig.3.1 に示す。本論文では、埋設管からの反射モデルとして、電磁波が最短距離地点、すなわち埋設管の表面に垂直に入射する地点で反射するモデルを用いる。 $i = 0 \sim n - 1$ まで n 個の観測データのうち、 i 番目の観測地点 u_i において、アンテナから埋設管までの電磁波の伝搬距離 l_i は、

$$l_i = -r + \sqrt{(u_i - l_u)^2 + (r + l_d)^2} \tag{3.1}$$

と表わされる。このとき電磁波は、

$$2\beta l_i = \omega y_{T,i} \tag{3.2}$$

の位相遅れを伴って観測される。ここで、未知パラメータ \boldsymbol{x} を $\boldsymbol{x} = [r, l_u, l_d, \varepsilon]^T$ とすると、電磁波の伝搬時間 $y_{T,i}(\boldsymbol{x})$ は、式 (2.7), (3.1), (3.2) より

$$y_{T,i}(\boldsymbol{x}) = \frac{2\beta l_i}{\omega} = \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{c_0} \{-r + \sqrt{(u_i - l_u)^2 + (r + l_d)^2}\} \tag{3.3}$$

とモデル化できる。式 (3.3) より、測定値、すなわち伝搬時間と未知パラメータとの関係式としてモデル化できる。これは最小二乗法に際しての回帰方程式となる。また式 (3.3) より、埋設位置は擬似双曲線の頂点に対応していると考えることができる。管半径と比誘電率は、その

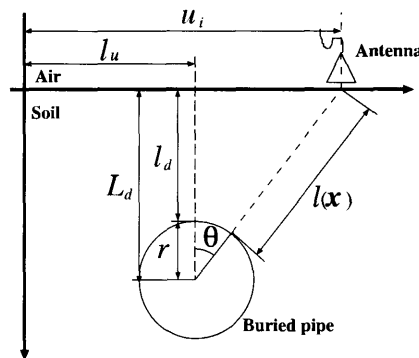


Fig.3.1. Condition of buried pipe.

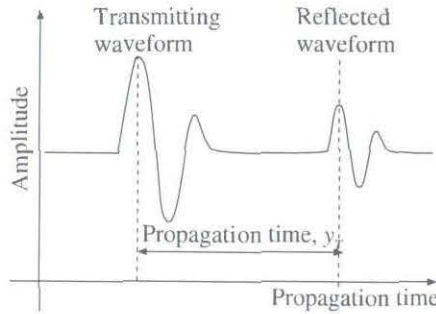


Fig.3.2. Transmitting wave and the reflected wave from buried object.

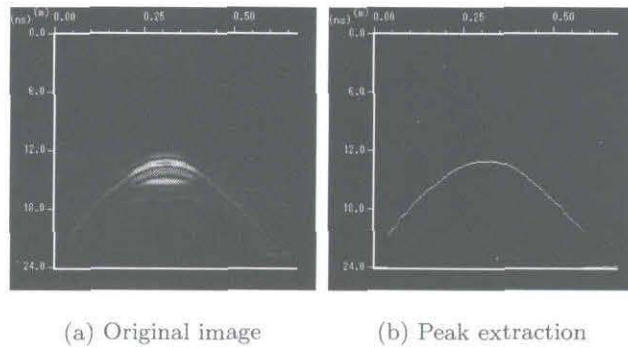


Fig.3.3. Pseudo-hyperbolic pattern extracted from the propagation time of electromagnetic wave.

影響の仕方が若干異なるものの、ともに擬似双曲線の開き具合に対応しており、両者を同時に推定することは困難である (3.3.1 で詳述)。そこで本論文では、比誘電率は事前に把握できているものとし、地中レーダによって得られた観測データ $\hat{\mathbf{y}}$ を、非線形最小二乗法を用いて擬似双曲線に当てはめることにより、管半径、埋設位置を同時推定する。このとき、Fig.3.1 に示すように、管中心を通る垂線からアンテナまでの偏角を θ とし、 $-\theta_n \sim \theta_n$ の範囲を当てはめる観測データの範囲とする。以下では、 θ_n を片側合成開口角と呼ぶ。本手法において、観測データの範囲は、推定誤差に大きく影響する。片側合成開口角の変化に対する推定誤差への影響については、3.4 節で述べる。Fig.3.2 に埋設管からの観測波形のモデルを示す。本論文では、送信パルスの初期ピークに基準点を取り、同基準点から埋設管による反射波のピークまでの時間をアンテナから埋設管までの伝搬時間 y_T とした。Fig.3.3(a) に地中レーダによって得られた観測画像を、Fig.3.3(b) に各観測点における伝搬時間 y_T を反映した擬似双曲線を示す。

3.2.2 管半径と埋設位置の同時推定

先の回帰方程式 (3.3) に、非線形最小二乗法を適用する。観測行列を \mathbf{H} 、観測値の共分散行列を $\Sigma_{\mathbf{y}}$ とすると、残差 2 乗和 $S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)})$ を最小とする未知パラメータ \mathbf{x} の k 次の修

正ベクトル $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ は

$$\begin{aligned} \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} &= \arg \min_{\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}} S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}) \\ &= (\mathbf{H}^{(k)T} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{H}^{(k)})^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{y}}^{-1} \Delta \mathbf{y}^{(k)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

より, 推定することが可能となる. ここで, $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$, $\mathbf{H}^{(k)}$ は, それぞれ

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{y}^{(k)} &= \tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{y}_{T,0} \\ \tilde{y}_{T,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{T,n-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{T,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{T,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{T,n-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{T,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_d} \\ \frac{\partial y_{T,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_d} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_d} \end{bmatrix} \mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \quad (3.6)$$

である. 式 (3.4) より求めた $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ を, 式 (3.7) に代入することにより, 新たな更新ベクトル $\hat{\mathbf{x}}^{(k+1)}$ を得ることができる.

$$\hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \quad (3.7)$$

これを反復することにより, 未知パラメータ $\hat{\mathbf{x}}$ の最尤推定値を得ることが可能となる.

3.3 管半径推定の誤差解析

3.3.1 伝搬時間に対する管半径と比誘電率の従属性

管半径と比誘電率は, 類似した形で擬似双曲線を変形させるが, その変形のさせ方は若干異なる. その意味では, 誤差のないデータが十分に得られれば, 両者はともに推定することが可能である. しかし, 実際には, 観測データは誤差を含むので, 同時に推定することは困難である. 以下では, この同時推定の困難性について検討する. 伝搬時間の計測誤差 $\sigma_{y_T}^2$ は, アンテナを走査した際の機械的な振動や地面の凹凸などを主要因として捉え, 各観測点ごとに相関がないという誤差モデルを考える. つまり観測値の共分散行列は, $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{y}} = \sigma_{y_T}^2 \mathbf{I}_n$ となる. すると, 未知パラメータの共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}}$ は

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{H}^T \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{H})^{-1} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \sigma_{y_T}^2 \quad (3.8)$$

によって表される. 以下では, 一例として, Table.3.1 に示す条件を用いて $\boldsymbol{\Sigma}_{\hat{\mathbf{x}}}$ を計算した結果を示す. ここで Δu は, サンプリング間隔, すなわち隣り合う観測地点の間隔である. また, 片側合成開口角 $\theta_n = 30$ [deg] とし, 計算した.

Table.3.1. parameter values for simulation.

r	56.5 [mm]	ε	3.63
l_u	400 [mm]	Δu	2.5 [mm]
l_d	200 [mm]	σ_{yT}	1.24×10^{-2} [ns]

I. 3 変数 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{r}, \hat{l}_u, \hat{l}_d]^T$ のとき

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{r}}^2 & \tau_{\hat{r}\hat{l}_u} & \tau_{\hat{r}\hat{l}_d} \\ \tau_{\hat{l}_u\hat{r}} & \sigma_{\hat{l}_u}^2 & \tau_{\hat{l}_u\hat{l}_d} \\ \tau_{\hat{l}_d\hat{r}} & \tau_{\hat{l}_d\hat{l}_u} & \sigma_{\hat{l}_d}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.244 & 0.035 & 0.195 \\ 0.035 & 0.085 & 0.001 \\ 0.195 & 0.001 & 0.019 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ここで、 σ^2 , τ は、それぞれ分散、共分散を表している。式 (3.9) より、分散 $\sigma_{\hat{r}}^2$, $\sigma_{\hat{l}_u}^2$, $\sigma_{\hat{l}_d}^2$ の値は小さく、標準偏差は、それぞれ 2.06 mm, 0.29 mm, 0.14 mm より、精度よく推定することが可能であることを示している。しかし、 $\sigma_{\hat{r}}^2 \gg \sigma_{\hat{l}_u}^2 > \sigma_{\hat{l}_d}^2$ であるから、管半径の推定誤差は、水平位置や埋設深さの推定誤差に比べ大きくなることが推測される。土中の比誘電率が既知の場合における各パラメータの分散の大小関係については、付録1. で検討する。また、 $\tau_{\hat{r}\hat{l}_u} = 0.035$, $\tau_{\hat{l}_u\hat{l}_d} = 0.001$ より、相関係数はそれぞれ 0.06, 0.02 となる。よって、水平位置は他のパラメータと相関がないとみなせる。その一方で、管半径と埋設深さについては、それらの共分散 $\tau_{\hat{r}\hat{l}_d} = 0.195$ より、相関係数は 0.69 となり、若干の相関関係が認められる。これは、管半径が大きくなれば、双曲線の頂点の凸度は減少し、結果として双曲線の頂点が推定し難くなるためと考えられる。

II. 4 変数 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{r}, \hat{l}_u, \hat{l}_d, \hat{\varepsilon}]^T$ のとき

次に、未知パラメータとして、比誘電率を加えた 4 変数 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{r}, \hat{l}_u, \hat{l}_d, \hat{\varepsilon}]^T$ を同時に推定したときの推定誤差について検討する。この場合、観測行列 \mathbf{H}' は

$$\mathbf{H}' = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{T,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial y_{T,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial \varepsilon} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial \varepsilon} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

である。このとき、未知パラメータの共分散行列は

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{r}}^2 & \tau_{\hat{r}\hat{l}_u} & \tau_{\hat{r}\hat{l}_d} & \tau_{\hat{r}\hat{\varepsilon}} \\ \tau_{\hat{l}_u\hat{r}} & \sigma_{\hat{l}_u}^2 & \tau_{\hat{l}_u\hat{l}_d} & \tau_{\hat{l}_u\hat{\varepsilon}} \\ \tau_{\hat{l}_d\hat{r}} & \tau_{\hat{l}_d\hat{l}_u} & \sigma_{\hat{l}_d}^2 & \tau_{\hat{l}_d\hat{\varepsilon}} \\ \tau_{\hat{\varepsilon}\hat{r}} & \tau_{\hat{\varepsilon}\hat{l}_u} & \tau_{\hat{\varepsilon}\hat{l}_d} & \sigma_{\hat{\varepsilon}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10698 & -2.324 & -4215 & 164.7 \\ -2.324 & 0.085 & 0.931 & -0.036 \\ -4215 & 0.931 & 1661 & -64.93 \\ 164.7 & -0.036 & -64.93 & 2.538 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

となった。式 (3.11) より、水平位置の分散 $\sigma_{\hat{l}_u}^2$ は小さく、精度よく推定できることを示している。しかし、その他の未知パラメータの分散は、3 変数のときと比べ、著しく大きい。また、管半径と比誘電率との間の相関係数は 0.99 にも達し、極めて従属関係が強い。このことから、観測画像からの擬似双曲線の情報だけでは、管半径と比誘電率を同時に推定することは困

難であることがわかる。なお、3変数と4変数で、いずれの場合も水平位置に対する共分散が小さいのは、水平位置が埋設深さなど、他の未知パラメータに対してほとんど相関をもたないことに因る。

3.4 偶然誤差と系統誤差の誤差解析

3.4.1 伝搬時間の計測誤差に起因する管半径の推定誤差

本手法の管半径推定に伴う、偶然誤差について考える。提案手法では、管半径と埋設位置を同時推定するが、埋設位置に関しては、管半径に比べ、精度よく推定できることは明らかなので、以下では議論しない。また、前節の結果から、水平位置 l_u は、他の未知パラメータとほぼ相関がなかった。本節では、このような特性に着目し、導出を容易にするための工夫として管半径 r と埋設深さ l_d のみを未知パラメータ $\mathbf{x} = [r, l_d]^T$ とする。

偶然誤差は、観測画像から抽出される擬似双曲線の揺らぎとして示される観測誤差、すなわち伝搬時間のばらつきに起因するものである。その原因は、アンテナを走査した際の機械的な振動や量子化誤差などである。この伝搬時間の計測誤差は、各観測点ごとに相関がないという誤差モデルを考える。つまり、観測値の共分散行列は

$$\Sigma_{\mathbf{y}} = \sigma_{y,T}^2 \mathbf{I}_n \quad (3.12)$$

となる。このときの未知パラメータの共分散行列は

$$\begin{aligned} \Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} &= \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{r}}^2 & \tau_{\hat{r}\hat{l}_d} \\ \tau_{\hat{l}_d\hat{r}} & \sigma_{\hat{l}_d}^2 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{C}_{(r,l_d)} \sigma_y^2 \mathbf{I}_n \mathbf{C}_{(r,l_d)}^T = (\mathbf{H}^n{}^T \mathbf{H}^n)^{-1} \sigma_{y,T}^2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

となる。ただし

$$\mathbf{C}_{(r,l_d)} \equiv (\mathbf{H}^n{}^T \mathbf{H}^n)^{-1} \mathbf{H}^n{}^T \quad (3.14)$$

$$\mathbf{H}^n = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{T,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_d} \\ \frac{\partial y_{T,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_d} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_d} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

である。行列 $(\mathbf{H}^n{}^T \mathbf{H}^n)^{-1}$ を

$$(\mathbf{H}^n{}^T \mathbf{H}^n)^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.16)$$

と表す。ここで各行列成分は、離散値 u に対する総和演算である。 u を連続値とみなし、偶関数であることを考慮して、総和演算を積分で近似すると

$$A_{11} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{\partial y_i}{\partial r} \right)^2 \approx \frac{2}{\Delta u} \int_{u=0}^{u=l_u} \left(\frac{\partial y(u)}{\partial r} \right)^2 du$$

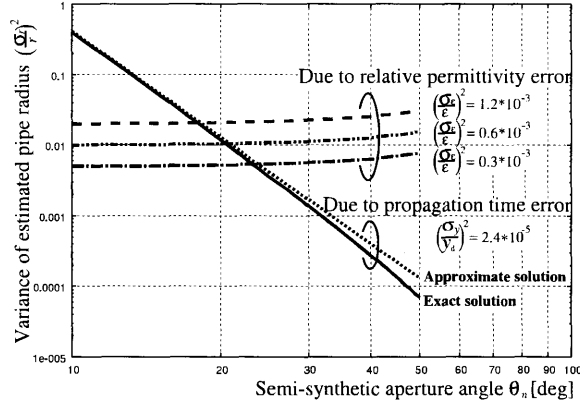


Fig.3.4. Errors propagated from the measurement error of propagation time and the setting error of relative permittivity.

$$= \frac{2}{\Delta u} \left(\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{c_0} \right)^2 \int_0^{l_u} \left\{ -1 + \frac{L_d}{\sqrt{(u-l_u)^2 + L_d^2}} \right\}^2 du \quad (3.17)$$

となる．ここで， L_d は埋設管の中心までの深さである． $u = L_d \tan \theta$ より， u から θ に変数変換すると，式 (3.13)，(3.16)，(3.17) より

$$\sigma_{\hat{r}}^2 = \frac{\Delta u}{2L_d} \cdot \left(\frac{c_0}{2\sqrt{\varepsilon}} \right)^2 \cdot \frac{\theta_n}{\det(\mathbf{H}^n T \mathbf{H}^n)} \cdot \sigma_{y,T}^2 \quad (3.18)$$

$$\tau_{\hat{r} \hat{l}_d} = \frac{\Delta u}{2L_d} \cdot \left(\frac{c_0}{2\sqrt{\varepsilon}} \right)^2 \cdot \frac{-\theta_n + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+\sin \theta_n}{1-\sin \theta_n} \right)}{\det(\mathbf{H}^n T \mathbf{H}^n)} \cdot \sigma_{y,T}^2 \quad (3.19)$$

$$\sigma_{\hat{l}_d}^2 = \frac{\Delta u}{2L_d} \cdot \left(\frac{c_0}{2\sqrt{\varepsilon}} \right)^2 \cdot \frac{\theta_n + \tan \theta_n - \ln \left(\frac{1+\sin \theta_n}{1-\sin \theta_n} \right)}{\det(\mathbf{H}^n T \mathbf{H}^n)} \cdot \sigma_{y,T}^2 \quad (3.20)$$

となる．ここで

$$\det(\mathbf{H}^n T \mathbf{H}^n) \equiv \theta_n \tan \theta_n - \frac{1}{4} \ln^2 \left(\frac{1+\sin \theta_n}{1-\sin \theta_n} \right) \quad (3.21)$$

である．片側合成開口角 θ_n に関して 5 次までテイラー近似すると，伝搬時間の計測誤差に起因する管半径の分散 $\sigma_{\hat{r}}^2$ は，式 (3.19) より

$$\left(\frac{\sigma_{\hat{r}}}{r} \right)^2 \approx \frac{\Delta u}{2L_d} \cdot \frac{45}{\theta_n^5} \cdot \left(\frac{l_d}{r} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{yT}}{y_d} \right)^2 \quad (3.22)$$

と表すことができる．ここで y_d は埋設管直上からの伝搬時間である．式 (3.22) より，管半径の分散は，片側合成開口角の 5 乗に反比例するという，重要な特性が明らかになった．また，誤差はサンプリング間隔 Δu に比例することもわかる．誤差伝搬の様子を Fig.3.4 に示す．ここでも，Table.3.1 に示す条件を用いた．図より，式 (3.22) で示した伝搬時間の計測誤差に起因する管半径推定誤差の近似解（点線）は，式 (3.19) に示す厳密解（実線）とよく一致しており，これが妥当であることがわかる．また，片側合成開口角を大きくとるほど，急激に管半径の推定誤差が小さくなることも確認できる．

3.4.2 比誘電率の設定誤差に起因する管半径の推定誤差

次に、本手法の管半径推定に伴う、系統誤差について考える。本手法では測定対象領域全体について、土の比誘電率を一定とし、しかもその値を正確に設定しなければならないが、その設定値も誤差を免れない。比誘電率の設定誤差は、平均的には、管半径の推定に際して一定のバイアス、つまり系統誤差をもたらす。本研究では、この比誘電率の設定誤差は、アンテナの位置によらず一定であるという誤差モデルを考え、評価に際しては、比誘電率の設定誤差の分散 σ_ε^2 を用いる。すると、観測値の共分散行列は

$$\Sigma_{\mathbf{y}} = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} \sigma_\varepsilon^2 \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} \right)^T = \sigma_\varepsilon^2 \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} \right)^T \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} = \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial y_{T,0}}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial \varepsilon} & \cdots & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial \varepsilon} \end{array} \right]^T \quad (3.24)$$

となる。このときの未知パラメータの共分散行列は、

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{C}_{(r,l_d)} \sigma_\varepsilon^2 \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} \left(\frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \varepsilon} \right)^T \mathbf{C}_{(r,l_d)}^T \quad (3.25)$$

と表すことができる。前項と同様に、離散値 u に対する総和演算を、 u を連続値とみなし積分で表す。そして θ に変数変換すると、比誘電率 ε の設定誤差に起因する、管半径の分散は

$$\left(\frac{\sigma_{\hat{r}}}{r} \right)^2 = \left\{ -\frac{1}{2} + \frac{L_d(\theta_n \cos \theta_n - 2 \sin \theta_n) \ln \left(\frac{1 + \sin \theta_n}{1 - \sin \theta_n} \right)}{8r \cos \theta_n \det(\mathbf{H}^T \mathbf{H})} + \frac{L_d \theta_n \tan \theta_n}{4r \cos \theta_n \det(\mathbf{H}^T \mathbf{H})} \right\}^2 \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 \quad (3.26)$$

と表すことができる。先の Fig.3.4 には、比誘電率の設定誤差に起因する管半径推定誤差も合わせて示してある。このように、比誘電率の設定誤差は、片側合成開口角が変化しても、管半径の推定値の分散は、ほぼ一定という、これもまた重要な特性がわかる。また、ここに示した計算例では、概ね片側合成開口角 20 度を境にして、支配的な要因が伝搬時間の計測誤差から、比誘電率の設定誤差に遷移していることがわかる。これらの知見は、提案手法を適用して管半径を推定する際、推定値に含まれる誤差を予測するという観点からも、重要である。なお、実際の土媒質は、本項で仮定したように均質ではなく、観測位置毎に比誘電率は一定でない。観測位置によるバイアスとして、比誘電率のずれが生じているのであれば、これは容易にモデル化することはできない。しかし、観測位置ごとに比誘電率がランダムに変動しているのであれば、それは上述の伝搬時間の計測誤差に置き換えることにより、近似的にモデル化することができる。

3.5 埋設物の探査実験

提案手法の有効性を確認するため、複数の埋設管の探査実験を行った。Fig.3.5 に示すように W1200 × D450 × H450 mm の水槽の中に乾燥させた土を満たした。この中に、半径 30.3、

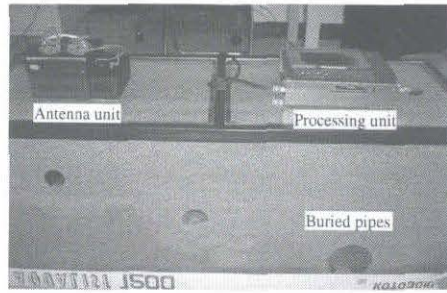


Fig.3.5. Experimental setup.

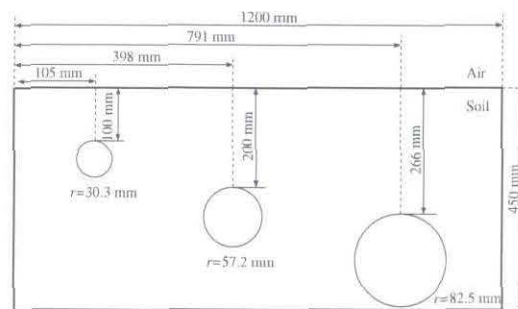


Fig.3.6. Underground cross-section drawing of experimental field.

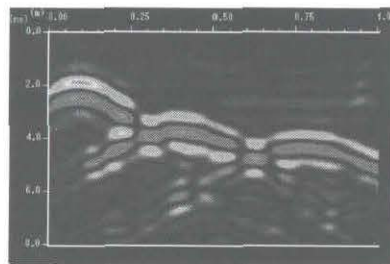


Fig.3.7. Scanned image by GPR.

57.2, 82.5 mm の大きさの異なる鑄鉄管を, 上端がそれぞれ 100.0, 200.0, 266.0 mm の深さとなるように埋設し, 実験を行った. Fig.3.6 にそのときの断面図を示す. サンプル間隔は 2.5 mm, 時間の測定単位は 8.0ns として, レーダ探査を 20 回繰り返して行った. また, 土の比誘電率を求めるべく, 事前に, 深さ 300.0 mm の位置に鉄板を埋設し, 地中レーダによって埋設物を探査した. その結果, 鉄板の深さと電磁波の伝搬時間より, 使用した土の比誘電率は, $\epsilon = 3.63$ と求められた. 埋設管の観測画像を Fig.3.7, 埋設管からの反射波の第一ピークを抽出した画像を Fig.3.8, 非線形最小二乗法により擬似双曲線に当てはめた結果を Fig.3.9 に示す. 前処理として, 上に凸の範囲を当てはめ, 未知パラメータを仮に求める. そして, その値を用いて左右対称に片側合成開口角をとり, 当てはめの範囲を決定した. このとき, 左, 中, 右の埋設管に対して, 片側合成開口角 θ_n を 15~20 度まで変化させたときの管半径推定値

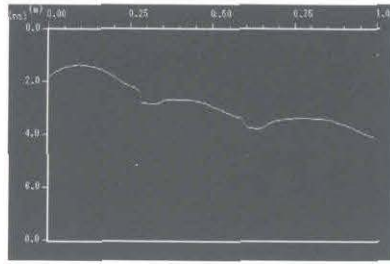


Fig.3.8. Peak extraction from GPR scanned image.

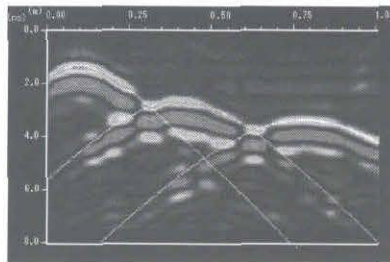


Fig.3.9. Pseudo-hyperbolic fitting by nonlinear least-squares method.

の分散の実験値を求め、それぞれを記号○, □, △により Fig.3.10 に示す。また、伝搬時間の計測誤差に関する誤差伝搬の理論式 (3.22) により求めた近似解もそれぞれ、実線、一点鎖線、破線で Fig.3.10 に示す。ここで、伝搬時間の分散 $(\sigma_{y_T}/y_d)^2$ は、抽出した第一ピークと擬似双曲線を当てはめたときの伝搬時間差から求めた。

Fig.3.10 より、管半径推定値の分散の実験値と、伝搬時間の計測誤差に起因する管半径の推定誤差の理論式 (近似解) は、よく一致していることがわかる。なお、各未知パラメータの推定値は、Fig.3.10 に示される分散のばらつきの範囲内で、真値に一致している。一例として、片側合成開口角 20 度の位置における観測データを当てはめたときの推定結果を Table.3.2 に示す。Table.3.2 より、各未知パラメータの推定誤差の平均は、それぞれ、管半径は 29.6%、水平位置は 2.4%、埋設深さは 5.9% 以下の誤差で推定されている。このように、本手法は複数の埋設管からの反射波が重なりあった状況でも、十分な精度で埋設状況を把握できることを確認した。

Table.3.2. Estimated results by proposed method.

pipe radius	\hat{r}		\hat{l}_u		\hat{l}_d	
	[mm]	error	[mm]	error	[mm]	error
30.0	21.1	29.6%	107.0	1.9%	106.3	5.9%
56.5	52.6	6.9%	392.0	1.5%	207.7	3.7%
82.0	75.7	7.7%	772.0	2.4%	270.0	1.5%

次に、より広範囲な片側合成開口角をとり、伝搬時間の計測誤差に起因する管半径の推定誤差の理論式の妥当性を調べた。この実験では、片側合成開口角を広範囲にとれるように、半径 56.5 mm の単管を深さ $l_d=200.0$ mm に埋設した状態で、レーダ探査を 30 回繰り返し行った。抽出した第一ピークと擬似双曲線を当てはめたときの伝搬時間差の分散を求めた結果、 $(\sigma_{y_T}/y_d)^2 = 2.43 \times 10^{-5}$ であった。管半径推定値の分散 σ_r^2 の実験値と、理論式 (3.22) より求めた誤差伝搬式の近似解のグラフを Fig.3.11 に示す。図より、実験から求めた σ_r^2 と、式 (3.22) の近似解は、全体にわたりよく一致していることがわかる。これらの結果より、管半径の推定値の誤差が予測できることがわかった。

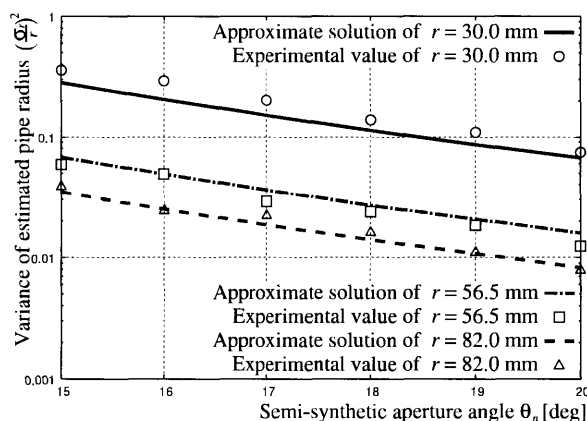


Fig.3.10. Comparison of approximate solutions and experimental values for multiple buried pipes.

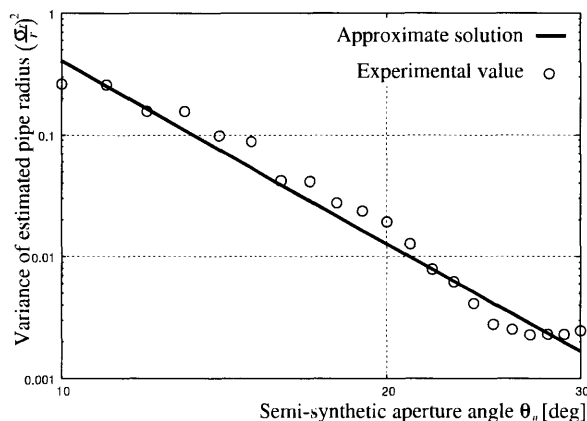


Fig.3.11. Comparison of approximate solutions and experimental values for wide range of θ_n .

3.6 むすび

本論文では、地中レーダで計測される受信波形の擬似双曲線が、管半径を反映しているという点に着目し、管半径、埋設位置を同時に推定する手法を提案した。さらに、伝搬時間の計測誤差と比誘電率の設定誤差が、管半径の推定値に与える影響を解析した。そして、大きさの異なる複数の埋設管を用いた実験の結果、提案手法の有効性を確かめることができ、複雑な地下埋設状況においても有効であることを示した。また、地中レーダ探査において、大きな影響を与える伝搬時間の計測誤差と比誘電率の設定誤差が与える影響を定量的に評価することにより、実際の現場において、推定結果に含まれる誤差を予測することができる。その結果、より精度の高い地中探査をすることで、地下工事に伴う危険度を下げることが期待できる。

第4章

地中レーダによる比誘電率と埋設管半径の同時推定

4.1 概要

本章では、地中レーダによる観測画像からの比誘電率と埋設管半径の同時推定について考察する。土中の比誘電率は、土質や含水率に大きく影響を受けるため、一般的に把握できない。しかし前章で述べたように、伝搬時間に対して管半径と比誘電率は強い従属関係にあるため、同時推定は困難である。そこで反射波の伝搬時間と観測強度の両方を活用することで、比誘電率と管半径の同時推定を試みている研究がある。田中らは、鉄筋からのモデル反射波形を事前にデータベースとして保存しておき、観測波形とのテンプレートマッチングを行うことで、コンクリート中の比誘電率及び鉄筋の径を推定する手法を提案している [15, 16]。この手法は、テンプレートマッチングを行うことで、結果的に、反射波の伝搬時間と観測強度の両方を活用することになり、比誘電率と径の同時推定を可能にしている。しかし、この手法は、事前に対象のモデル波形を大量に計測しておかねばならないという点で手間がかかること、そして、想定外の径や材質、媒質の場合、推定困難であることなど、実用面での困難さを伴っている。これらの問題は距離による減衰項を考慮していないなど、観測強度のモデル化が不十分であったことと、テンプレートマッチングという総当たりの推定手法を用いていたことに起因する。

本論文の枠組みも、反射波の伝搬時間と観測強度の両方を活用することで、管半径と比誘電率の同時推定を可能とするものである。埋設管からの反射波の観測強度は、埋設管の材質、すなわち反射係数に大きく依存するが、筆者らは、その影響を取り除くために、反射波の観測強度について、埋設管直上における最大振幅で正規化した相対的な観測強度を用いることを提案する。相対強度に着目することにより、埋設管の材質に関わらず、さらに、水分含有率の低い無損失性媒質と見なせる条件の下では比誘電率にも関係なく、管半径の情報を得ることができ。なお、前提条件として、土中は均質で等方性かつ分散がないものとしている。また、簡単化のため、アンテナは埋設管に対して垂直な方向に走査するものと仮定し、アンテナの形状は、送・受信アンテナが同一点にあるとするモノスタティック配置と見なして定式化する。ただし、埋設管に垂直な走査方向は、埋設管直上付近でアンテナを回転させれば、反射波形の振

幅が最大になるときの方向として得ることができ、またモノスタティックでない場合も、幾何学的形状を考えれば、同様に定式化できる。

本論文では、最後に、提案手法の有効性を確認するため、土中における埋設管の探査実験を行ない、管半径と比誘電率が同時推定できることを示す。

4.2 提案手法

4.2.1 反射波の観測強度のモデル化

次に、地中レーダによる埋設管からの反射波の観測強度について検討する。Fig.4.1に埋設管からの散乱波の受信イメージを示す。このとき、観測地点 u_i おいて観測される埋設管からの反射強度 I_i は、

$$I_i = |E(l, \theta)| \cdot S \cdot D_r(\theta) \cdot \frac{e^{-\alpha l_i}}{l_i} \tag{4.1}$$

と定義することができる。ここで、 S は管の散乱断面積、 D_r は受信機の指向特性を表わす。このとき、式 (4.1) に式 (2.2) を代入することで、

$$I_i = E_0 \cdot S \cdot D_e(\theta) \cdot D_r(\theta) \cdot \left(\frac{1}{l_i}\right)^2 \cdot e^{-2\alpha l_i} \tag{4.2}$$

が導かれる。ここで、散乱断面積 S は、埋設管の半径や材質などに依存し、容易には求められない。そこで、本論文では、観測地点 u_i における観測強度 I_i を埋設管直上における反射波の観測強度 I_0 で正規化することによって、この問題を解決する。すなわち、正規化した観測強度のモデル式 $y_{I,i}(\mathbf{x})$ は、

$$y_{I,i}(\mathbf{x}) = \frac{I_i}{I_0} = D_e(\theta) \cdot D_r(\theta) \cdot \left(\frac{l_d}{l_i}\right)^2 \cdot e^{-2\alpha(l_i - l_d)} \tag{4.3}$$

となり、定数項が全て相殺され、反射波の観測強度を単純なモデルで表すことが可能となる。以上のように求められた伝搬時間と観測強度のモデル式 (3.3), (4.3) は、ともに最小二乗法に際しての回帰方程式となる。

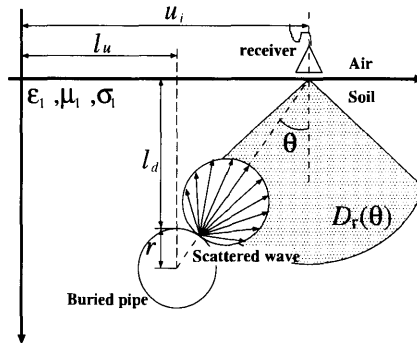


Fig.4.1. Scattered wave from buried pipe.

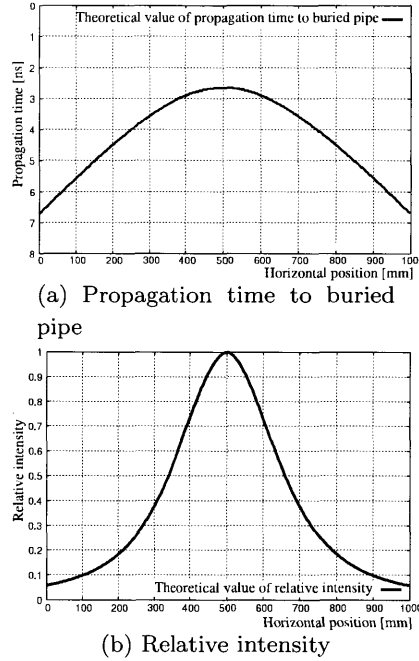


Fig.4.2. Observed value of propagation time and reflected intensity.

伝搬時間について式 (3.3) より，埋設管の水平位置と埋設深さは，疑似双曲線の頂点に対応していると考えることができる．また比誘電率は，疑似双曲線の曲率に影響を与える．管半径も同様に疑似双曲線の曲率に影響するが，観測地点が埋設管の水平位置から離れるに従って，その影響は比誘電率に比べて小さくなる．

その一方，最大振幅で正規化したときの観測強度は，乾土など，損失が小さい媒質を対象としたとき，相対強度を用いることによる相殺の効果もあり，媒質による減衰項は無視することができる．このとき相対的な観測強度は，式 (4.3) より，管半径と埋設位置には依存するが，比誘電率の影響は受けない．よって，伝搬時間と観測強度の情報をともに用いることで，管半径と比誘電率の同時推定を行うことができると考えられる．

4.2.2 管半径と比誘電率の同時推定に関する検討

以下では，同時推定の可能性について検討する．Fig.4.2(a) にシミュレーションによって求めた伝搬時間 y_T を表わす疑似双曲線を，Fig.4.2(b) に最大振幅で正規化した埋設管からの反射波の観測強度 y_I の分布を示す．このとき，シミュレーションの設定条件は $r = 57.2\text{mm}$ ， $l_u = 500.0\text{mm}$ ， $l_d = 200.0\text{mm}$ ， $\epsilon = 4.0$ とした．Fig.4.2(a) では疑似双曲線の頂点の位置と凸度，そして漸近線の勾配が，Fig.4.2(b) では頂点の水平位置と曲線の広がり，未知変数推定の手掛かりとなる．

ここで，観測値 \tilde{y} と理論値 $y(\mathbf{x})$ との一致度評価値 $S(\mathbf{x})$ を

$$S(\mathbf{x}) = \sum_i \left(\frac{\tilde{y}_{T,i} - y_{T,i}(\mathbf{x})}{\sigma_{y_{T,i}}} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{\tilde{y}_{I,i} - y_{I,i}(\mathbf{x})}{\sigma_{y_{I,i}}} \right)^2 \quad (4.4)$$

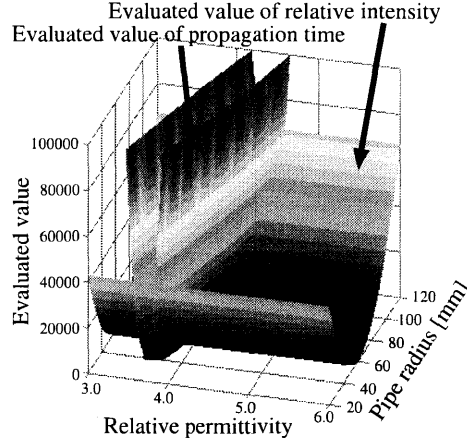


Fig.4.3. Distribution of evaluated value of propagation time and relative intensity.

と定義する. このとき, $\sigma_{y_{T,i}}^2$ と $\sigma_{y_{I,i}}^2$ は, それぞれ伝搬時間に関する観測値の誤差の分散, 反射強度に関する観測値の誤差の分散である. 実験に際しては, 観測値と理論値との差の分散を用いた. 以上の条件の下, 管半径と比誘電率をそれぞれ $r = 20.0\text{mm} \sim 120.0\text{mm}$, $\epsilon = 3.0 \sim 6.0$ の範囲内で変化させたときの伝搬時間と観測強度, それぞれの一致度評価値の分布を個別に示したものを Fig.4.3 に示す. ここで, 水平位置は, 他のパラメータとほとんど相関がなく独立しているので, 別に扱える. 埋設深さは, 比誘電率と埋設管直上における伝搬時間によって求められる. ここで, 埋設管直上における伝搬時間も, 他のパラメータとほとんど相関がなく独立した形で推定できる. したがって, 収束性の観点では管半径と比誘電率が重要であると考えられる. そこで以下では, 一致度評価値が管半径と比誘電率に対して単峰性を示すことを明らかにし, 管半径と比誘電率が推定できることを説明する. 上記の設定条件において, 管半径と比誘電率の真値 r^0, ϵ^0 を原点とし, 横軸を比誘電率の予測値 $\hat{\epsilon}$, 縦軸を管半径の予測値 \hat{r} としたときの伝搬時間の一致度評価値分布を計算し, それを等高線表示したものを Fig.4.4 に示す. Fig.4.4 から, 伝搬時間の一致度評価値が, 真値 r^0, ϵ^0 を通り, 概ね管半径の方向を向いている直線に対して線対称の形で谷を呈していることが分かる. この特性について理論的に考察する. $\hat{r} = r^0 + \Delta r$, $\hat{\epsilon} = \epsilon^0 + \Delta\epsilon$ を, 極座標系 $(\Delta a, \phi)$ で表わすと,

$$\hat{r} = r^0 + \Delta a \sin \phi \quad (4.5)$$

$$\hat{\epsilon} = \epsilon^0 + \Delta a \cos \phi \quad (4.6)$$

となる. このとき, 伝搬時間及び観測強度における予測値と真値との差は, それぞれ

$$f_i(\Delta a) = y_{T,i}(\Delta a) - y_{T,i}(0) \quad (4.7)$$

$$g_i(\Delta a) = y_{I,i}(\Delta a) - y_{I,i}(0) \quad (4.8)$$

と表わすことができる. 式 (4.7), (4.8) を Δa で偏微分すると,

$$\frac{\partial f_i(\Delta a)}{\partial \Delta a} = \sqrt{(\hat{L} - \hat{r})^2 + \left(\frac{2\hat{\epsilon}(\hat{r} + l_d - \hat{L})}{\hat{L}}\right)^2} \frac{\cos(\phi - \psi)}{c\sqrt{\hat{\epsilon}}} \quad (4.9)$$

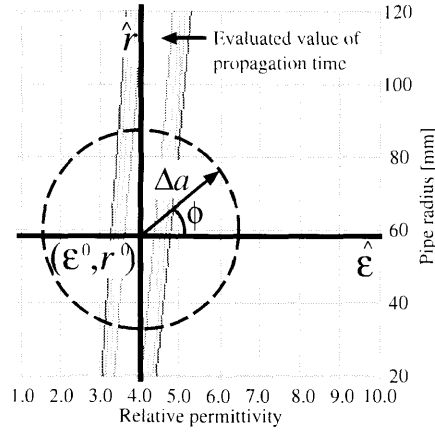


Fig.4.4. Contour map of evaluated value with propagation time.

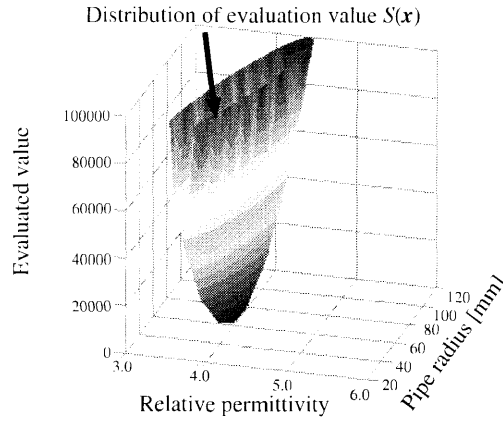


Fig.4.5. Distribution of evaluation value $S(\mathbf{x})$ to pipe radius and relative permittivity.

$$\frac{\partial g_i(\Delta a)}{\partial \Delta a} = \frac{2l_d^2 \cdot D(\theta)^2 \cdot (\hat{L} - \hat{r} - l_d) \cdot \sin \phi}{\hat{L}(\hat{L} - \hat{r})^3} \quad (4.10)$$

となる。ここで、

$$\psi = \arctan\left(\frac{2\hat{\varepsilon}(\hat{r} + l_d - \hat{L})}{\hat{L}(\hat{L} - \hat{r})}\right) \quad (4.11)$$

$$\hat{L} = \sqrt{(u_i - l_u)^2 + (\hat{r} + l_d)^2} \quad (4.12)$$

である。式(4.9)より、 $\frac{\partial f_i(\Delta a)}{\partial \Delta a}$ は、 Δa の大きさに関わらず、 $\phi = \psi + 90^\circ$, $\psi + 270^\circ$ 以外の全ての ϕ に対して常に正または負なので、 $f_i(\Delta a)$ は単調増加(減少)する。よって $\phi = \psi + 90^\circ$, $\psi + 270^\circ$ 以外の全ての ϕ に対して、 Δa の増加に伴って $f_i(\Delta a)^2$ は増大するため、下に凸となる。同様に、 $g_i(\Delta a)^2$ も式(4.10)より、 $\phi = 0^\circ$, 180° 以外の全ての ϕ に対して、下に凸となる。よって一致度評価値 $f_i(\Delta a)^2 + g_i(\Delta a)^2$ は、全ての ϕ に対して、下に凸な単峰性となることがわかる。また今回の条件では、式(4.11)より、伝搬時間の一致度評価値分布は、比誘電率の軸に対しておよそ $\phi = 89.5^\circ$ の傾きを持って分布することが分かる。一方、観測強度の一

致度評価値分布は、比誘電率の軸に対して水平に分布している。これらのことから伝搬時間と観測強度の一致度評価値分布は、ほぼそれぞれが互いに直交することがわかる。よって、観測強度が管半径の情報を、それを手掛かりとして伝搬時間が比誘電率の情報を与える。伝搬時間と観測強度の一致度評価値を加算したものを Fig.4.5 に示す。図より、一致度評価値は管半径と比誘電率に対して単峰性を示しており、伝搬時間と観測強度の情報から、比誘電率と管半径を一意に推定することが可能であることがわかる。

4.3 推定手法

先の回帰方程式 (3.3), (4.3) を、一致度評価値を表す式 (4.4) に代入し、これに非線形最小二乗法を適用して未知パラメータ \mathbf{x} を推定する手法について述べる。観測行列を \mathbf{H} 、観測値の共分散行列を $\Sigma_{\mathbf{y}}$ とすると、残差二乗和を最小とする未知パラメータ \mathbf{x} の k 次の修正ベクトルは

$$\begin{aligned}
 \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} &= \arg \min_{\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}} S(\hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}^{(k)}) \\
 &= (\mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_{\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{H}^{(k)})^{-1} \mathbf{H}^{(k)T} \Sigma_{\mathbf{y}}^{-1} \Delta \mathbf{y}^{(k)}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

より、推定することが可能となる。ここで、 $\Delta \mathbf{y}^{(k)}$ 、 $\mathbf{H}^{(k)}$ は、それぞれ

$$\begin{aligned}
 \Delta \mathbf{y}^{(k)} &= \tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{y}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\
 &= \begin{bmatrix} \tilde{y}_{T,0} \\ \tilde{y}_{T,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{T,n-1} \\ \tilde{y}_{I,0} \\ \tilde{y}_{I,1} \\ \vdots \\ \tilde{y}_{I,n-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{T,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{T,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{T,n-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{I,0}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ y_{I,1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \\ \vdots \\ y_{I,n-1}(\hat{\mathbf{x}}^{(k)}) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_{T,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{T,0}}{\partial \epsilon} \\ \frac{\partial y_{T,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{T,1}}{\partial \epsilon} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{T,n-1}}{\partial \epsilon} \\ \frac{\partial y_{I,0}}{\partial r} & \frac{\partial y_{I,0}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{I,0}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{I,0}}{\partial \epsilon} \\ \frac{\partial y_{I,1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{I,1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{I,1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{I,1}}{\partial \epsilon} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial y_{I,n-1}}{\partial r} & \frac{\partial y_{I,n-1}}{\partial l_u} & \frac{\partial y_{I,n-1}}{\partial l_d} & \frac{\partial y_{I,n-1}}{\partial \epsilon} \end{bmatrix} \mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \tag{4.15}$$

となる。また、伝搬時間の計測誤差 $\sigma_{y_{T,i}}^2$ 、観測強度の計測誤差 $\sigma_{y_{I,i}}^2$ は、アンテナを走査した際の振動や地面の凹凸、またアンテナの機械的特性が主要因として生じると考えられる。この

とき、各観測点ごとに相関がなく、等しいものとする、それぞれ $\sigma_{y_T}^2$, $\sigma_{y_I}^2$ で表すことができる。すると、観測値の共分散行列 Σ_y は、

$$\Sigma_y = \begin{bmatrix} \sigma_{y_T}^2 \mathbf{I}_n & 0 \\ 0 & \sigma_{y_I}^2 \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

となる。ここで、 \mathbf{I}_n は、 $n \times n$ の単位行列を表わす。式(4.13)より求めた $\Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)}$ を、式(4.17)に代入することにより、新たな更新ベクトル $\hat{\mathbf{x}}^{(k+1)}$ を得ることができる。

$$\hat{\mathbf{x}}^{(k+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(k)} + \Delta \hat{\mathbf{x}}^{(k)} \quad (4.17)$$

これを反復することにより、未知パラメータ $\hat{\mathbf{x}}$ の最尤推定値を得ることが可能となる。

4.4 実験

4.4.1 事前実験

地中レーダによる電磁波の伝搬特性を調べるため、アンテナの指向特性と距離による減衰の影響を調べる事前実験を行った。本研究では、中心周波数 700MHz、印加電圧のパルス幅が約 1ns のアンテナ (アイレック技建 (株)) を用いた。また電界は Fig.2.2 における Y 軸方向に振動する。まず初めに、アンテナの指向特性を調べるため、Fig.4.6 に示すように、土を挟んで送受信アンテナを向かい合わせ、それぞれを $-50^\circ \sim 50^\circ$ の範囲で、 5° ずつ入射角を変化させて、観測強度を計測した。なお、この実験ではアクリル板を介して土を挟んでいるが、後の埋設管の探査実験でも同様にアクリル板を介して電磁波を送受信している。このとき各角度ごとに 300 回計測を行い、相対強度の平均値から式 (4.3) に従い、 $D(\theta)$ を求めた。そのときの実験結果を Fig.4.7 に示す。本論文では、この曲線をよく表現できるモデルとして、6 次の多項式による近似式を $D_c(\theta)$, $D_r(\theta)$ として用いることにした。

次に、距離による減衰の影響について調べるため、

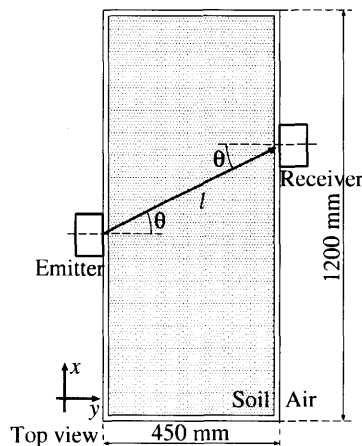


Fig.4.6. Experimental setup to calibrate directional characteristics of the GPR.

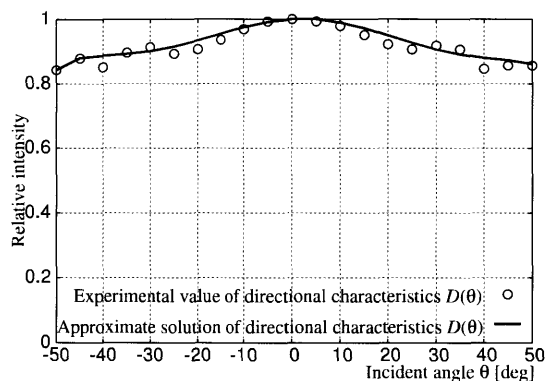


Fig.4.7. Experimental result of directional characteristics of the GPR.

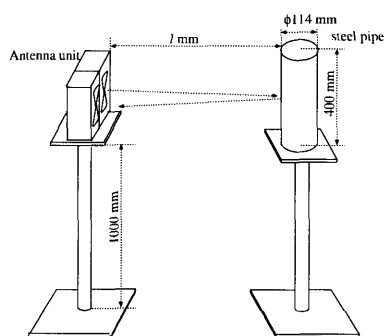


Fig.4.8. Experimental setup to calibrate attenuation by propagation distance.

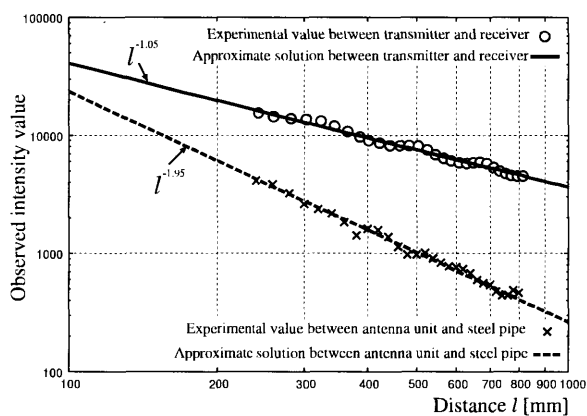


Fig.4.9. Experimental result of attenuation by propagation distance.

(1) 空中で送受信アンテナを並行に向い合わせ、伝搬距離に対する電磁波の減衰を観測する実験

(2) 空中で鉄管に向けて電磁波を放射し、そのときの反射強度を観測する実験 (Fig.4.8 参照) を行った。このとき、埋設管までの距離 l は、240.0 mm~800.0 mm まで、20.0mm ずつ変化させた。このときの実験結果を Fig.4.9 に示す。得られた観測値に対して累乗近似を行っ

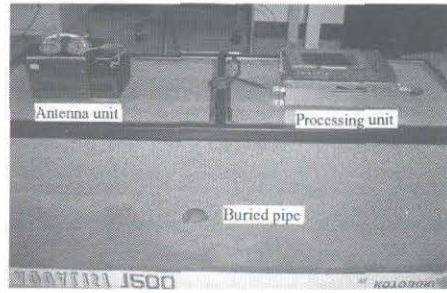


Fig.4.10. Experimental setup.

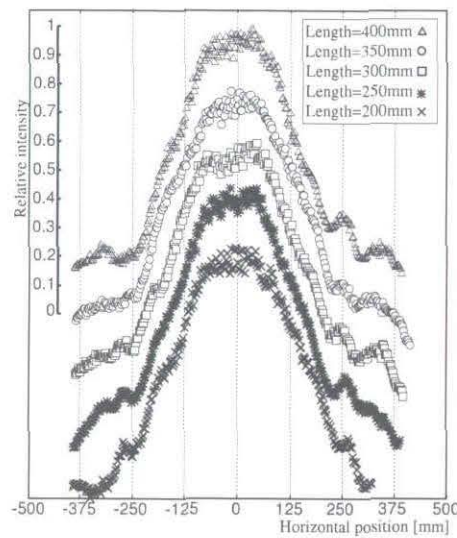


Fig.4.11. Comparison of relative observed intensities for the various buried pipe lengths.

たところ,

- (1) アンテナ間の片道における電磁波の減衰は、伝搬距離の-1.05 乗,
- (2) アンテナユニットと鉄管までの往復の電磁波の減衰は、伝搬距離の-1.95 乗となり、式 (4.2) で用いた伝搬距離の-2 乗で減衰する関係を確認することができた。

埋設管の探査実験を行う際の実験フィールドを Fig.4.10 に示す。W1200×D450×H450 mm のアクリルケースの中に乾燥させた土を満たした。また、土の上にはアクリルケースの側板と同じ厚さのアクリル板を載せ、その上を滑らせるようにして送受信機を一体としたアンテナユニットを走査した。このとき、実験フィールドの制限から、長手方向の長さ 400mm の鉄管を用いた。なお、埋設管の長さの影響について考察するため、事前実験として、半径 50.8mm の管を、長さ 50~400mm まで 50mm ずつ変化させて、観測強度分布を求めた。その結果、最大振幅は、管の長さが 50mm から波長 ($\lambda=235\text{mm}$) と同等程度になるまで、管が長くなるに従って増大するが、それ以降はほぼ一定になった。その一方で、Fig.4.11 に示すように、最大振幅で正規化することにより、観測強度分布は埋設管の長さにかかわらずほぼ一致しており、埋設管の長さの影響を打ち消すことができる。

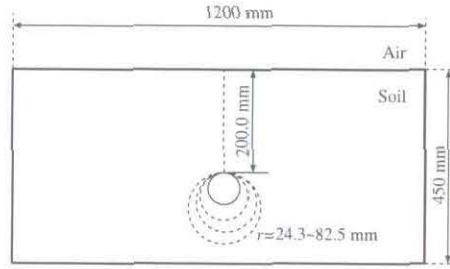


Fig.4.12. Underground cross-sectional drawing of experimental field.

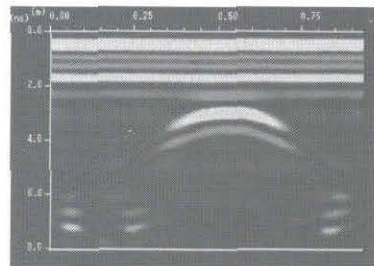


Fig.4.13. Scanned image by GPR.

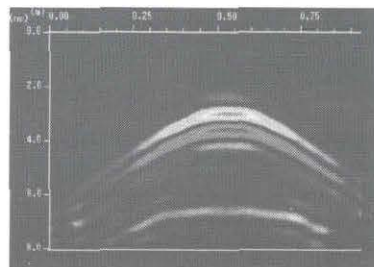


Fig.4.14. Elimination of direct wave.

4.4.2 埋設物の探査実験

提案手法の有効性を確かめるため、埋設管の探査実験を行った。ここで、文献 [17] より、乾土における導電率、透磁率、比誘電率をそれぞれ $\sigma_1 = 5.0 \times 10^{-5} \text{S/m}$, $\mu_1 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, $\epsilon = 4.00$ とすると、減衰定数 α は式 (2.6) より、 $\alpha = 0.00471 \text{Np/m}$ となる。この場合、例えば、埋設深さ 0.5m で、比較的伝搬距離が長くなる実験条件として片側合成開口角 $\theta_n = 45^\circ$ の位置を例にとり、媒質による減衰を求めると、 $e^{-2\alpha(l_i - l_d)} = 0.998$ と無視できるほど小さいことがわかった。よって、本実験では媒質による減衰の影響は、無視できるものとして扱う。半径 24.3mm, 30.3mm, 57.2mm, 82.5mm の鉄管をそれぞれ埋設深さ 200.0mm の位置に設置し、実験を行った。Fig.4.12 に実験フィールドの断面図を示す。サンプリング間隔は 2.5 mm, 時間の測定単位は 8.0ns とした。また、土の比誘電率の真値を調べるため、深さ 320.0mm の

Table.4.1. Estimated results by proposed method.

pipe radius	\hat{r}		\hat{l}_u		\hat{l}_d		$\hat{\varepsilon}$	
	[mm]	error	[mm]	error	[mm]	error		error
24.3	19.8	18.5%	530.8	0.6%	210.1	5.1%	3.28	0.1%
30.3	36.0	18.9%	519.3	0.7%	205.9	3.0%	3.31	0.6%
57.2	50.1	12.4%	537.5	1.2%	212.1	6.0%	3.13	4.7%
82.5	79.3	3.9%	523.7	1.2%	210.3	5.2%	3.23	1.7%

位置に鉄板を埋設し，地中レーダによって探査した．その結果，鉄板の深さと電磁波の伝搬時間から，使用した土の比誘電率は， $\varepsilon = 3.29$ と求められた．

以上の準備の下，Fig.4.13 に埋設管の観測画像を示す．図より，アンテナ間の直達波が埋設管からの反射波と重なりあって大きな影響を与えているのがわかる．反射波の観測強度を用いる本手法では，この直達波の影響を除去しなければならない．そこで，本論文では，あらかじめ埋設物が存在しないフィールドにおいて探査実験を行い，得られた観測波形との差分をとることにより，直達波の影響を除去した．その結果を Fig.4.14 に示す．図より，直達波の影響が概ね除去できていることがわかる．Fig.4.20(a)~(d) に伝搬時間の観測値をモデル式に当てはめた様子を，Fig.4.21(a)~(d) に埋設管からの反射強度の観測値をモデル式に当てはめた様子を示す．いずれも観測値は○で，当てはめた曲線は実線で示されている．図より，伝搬時間の観測値と比べ，反射強度の観測値は，ノイズが大きいことがわかる．各埋設管の探査実験において当てはめた伝搬時間のモデル式を比較した結果を Fig.4.20(e) に，観測強度のモデル式を比較した結果を Fig.4.21(e) に示す．このとき，観測データごとに管の水平位置が若干異なるため，当てはめたモデル式の水平位置を揃えた．図より，管半径の違いが観測値に反映されていることを実際に確かめることができた．このときの未知パラメータの推定結果と真値との誤差を表 4.1 に示す．表 4.1 より，水平位置，埋設深さ，比誘電率に関しては，それぞれ 6.0% 以下の誤差で推定できており，高精度に計測できることがわかる．また管半径に関しては，いずれの管半径推定値も真値から 7.1mm 以内の誤差の範囲内で推定できており，JIS 規格と照らし合わせることで，対象となる埋設管を把握するのに有効であると考えられる．

4.4.3 不均質な媒質におけるロバスト性の検討

本論文では，媒質は均質かつ無損失性を見なせることを前提としているが，実際に地下探査を行う場合，これらの仮定が必ずしも成立するとは限らない．そこで以下では，媒質が位置・深さによらず全体にわたりばらついている場合と，深さ方向に不均質な場合を例にとりて，提案手法が依って立つ前提から相違したときの影響を検討した．

Table.4.2. Unknown parameter estimation-errors propagated from measurement errors.

pipe radius	condition		estimation errors			
	$\sigma_{y_r}^2$	$\sigma_{y_l}^2$	$\sigma_{\hat{r}}^2$	$\sigma_{\hat{l}_u}^2$	$\sigma_{\hat{l}_d}^2$	$\sigma_{\hat{\epsilon}}^2$
24.3	0.0008	0.0019	11.05	0.049	1.63	0.0015
30.3	0.0014	0.0023	11.35	0.075	1.64	0.0015
57.2	0.0025	0.0034	17.83	0.140	2.49	0.0019
82.5	0.0022	0.0025	28.66	0.125	3.00	0.0033

全体にわたり不均質な場合

媒質が位置・深さによらず全体にわたりばらついている場合においても、観測値の共分散行列 Σ_y は、式 (4.16) で表わすことができる。ここでは、観測値の共分散行列が各未知パラメータに与える影響を誤差解析によって評価する。未知パラメータの共分散行列 $\Sigma_{\hat{x}}$ は、

$$\Sigma_{\hat{x}} = (H^T \Sigma_y^{-1} H)^{-1} \tag{4.18}$$

によって求められる。このとき、前節の実験条件における各未知パラメータの推定誤差の値を表 4.2 に示す。表より、観測値の共分散行列が Σ_y のとき、管半径、水平位置、埋設深さ、比誘電率の標準偏差は、それぞれ最大でも 5.35mm, 0.37mm, 1.73mm, 0.057 となった。このことから、各未知パラメータの標準偏差の値は十分に小さく、精度良く推定できることを示している。また、不均質の度合いが高くなり、観測値の計測誤差が $2\Sigma_y$, $3\Sigma_y$ と増加するにつれ、未知パラメータの推定値の分散も線形に増加する。このことから、全体にわたりばらつきをもった媒質中における観測値の計測誤差が与える各未知パラメータの推定誤差は、ある程度予測することができる。

深さ方向に不均質な場合

次に、深さ方向に不均質な場合について検討する。本論文では、雨水が地表面付近に浸水している場合を想定し、Fig.4.15 に示すように上層を湿土、下層を乾土で満たし、埋設管を設置して実験を行った。このとき湿土は [5] より、含水率 30% とした。乾土のときと同様に深さ既知で、鉄板からの伝搬時間と埋設深さの関係から比誘電率を求めたところ、 $\epsilon_w=15.9$ であった。Fig.4.16 にそのときの地中レーダ画像を、Fig.4.17 に直達波の影響を差し引いた画像を示す。Fig.4.16 より、4.0ns 付近で、湿土と乾土の境界からの強い反射波が確認できる。このときの埋設管からの伝搬時間をモデル式に当てはめた様子を Fig.4.18, 相対的な観測強度をモデル式に当てはめた様子を Fig.4.19 に示す。伝搬時間の計測誤差、観測強度の計測誤差は、それぞれ $\sigma_{y_r}^2=0.0022$, $\sigma_{y_l}^2=0.0048$ であった。このときの管半径推定値は 149.0mm, 誤差 80.6%, 埋設深さの推定値は、284.3mm, 誤差 18.5% となった。このことから、均質の条件に比べて誤差は増大したものの、今回の条件でも推定が可能であることを確認した。しかし、媒

質が二層に分かれている条件については、モデル化等、今後、検討を進める必要がある。

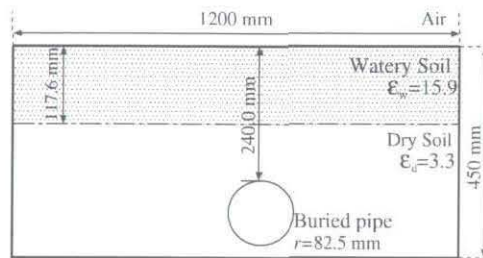


Fig.4.15. Underground cross-sectional drawing of two-layer medium experimental field.

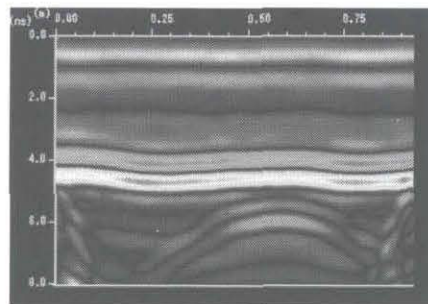


Fig.4.16. Scanned image for the two-layer medium.

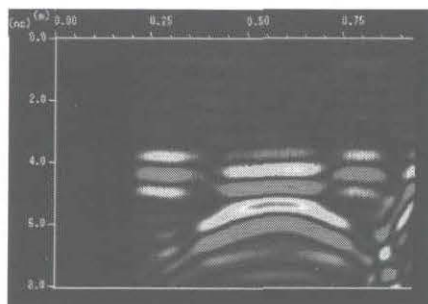


Fig.4.17. Elimination of direct wave.

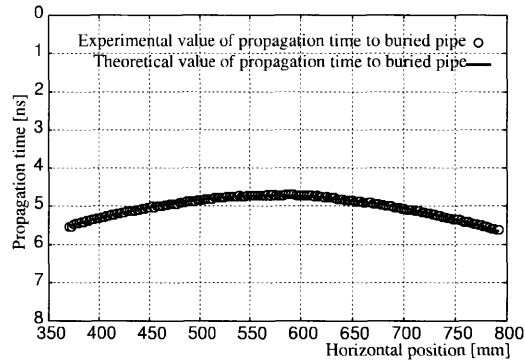


Fig.4.18. Observed value and fitted curve of propagation time.

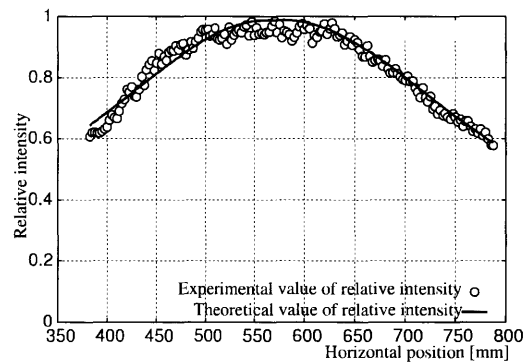
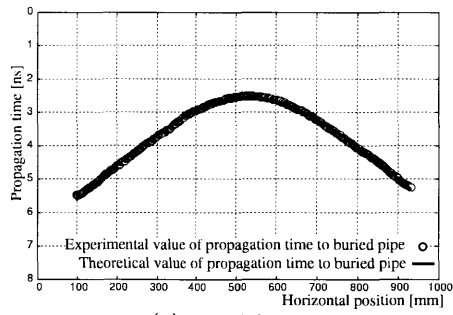


Fig.4.19. Observed value and fitted curve of reflected intensity.

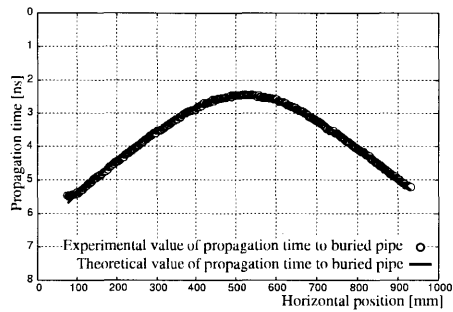
4.5 むすび

本論文では、地中レーダから観測される情報として、埋設管までの伝搬時間だけでなく、埋設管からの反射波の観測強度も利用することで、今まで困難であった管半径と比誘電率の同時推定を行う手法を提案した。そのために、埋設管直上における最大振幅で、観測強度を正規化することによって、管の反射係数や散乱断面積の影響を取り除く手法を提案した。埋設管の探査実験を行った結果、水平位置、埋設深さ、比誘電率に関しては、高精度に計測できることを確かめた。管半径に関しても、真値から 7.1mm 以内の誤差の範囲内で推定可能であり、地中レーダによる観測画像から埋設状況を把握するのに有効であると考えられる。

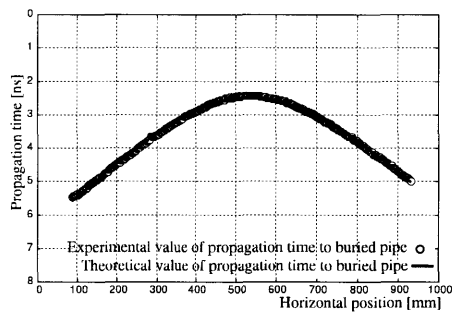
本手法は地下埋設物だけでなく、コンクリート中の鉄筋探査などにも応用可能であるが、今後は、それらへの有効性の確認、湿土に適用範囲を拡大することについても検討したい。



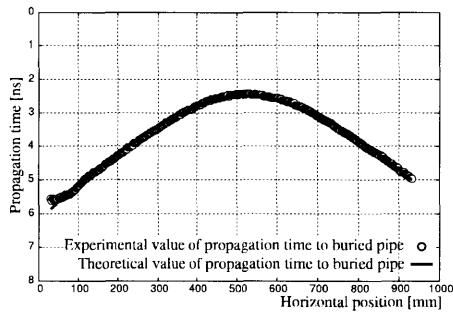
(a) $r=24.3\text{mm}$



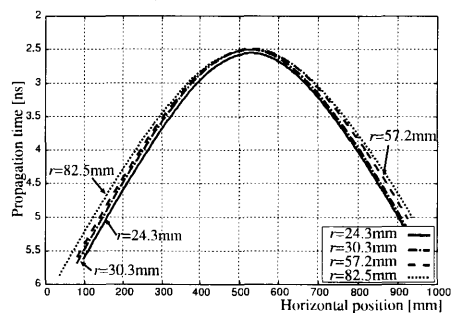
(b) $r=30.3\text{mm}$



(c) $r=57.2\text{mm}$

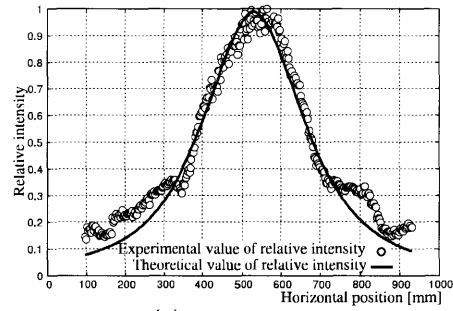


(d) $r=82.5\text{mm}$

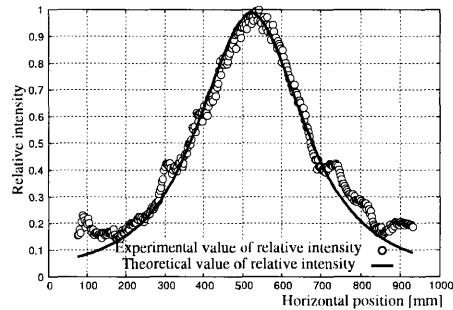


(e) Comparison of fitted theoretical formula of propagation time

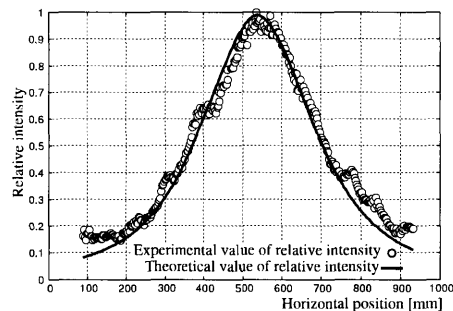
Fig.4.20. Observed value and fitted curve of propagation time.



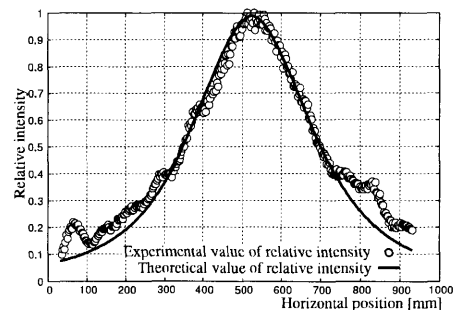
(a) $r=24.3\text{mm}$



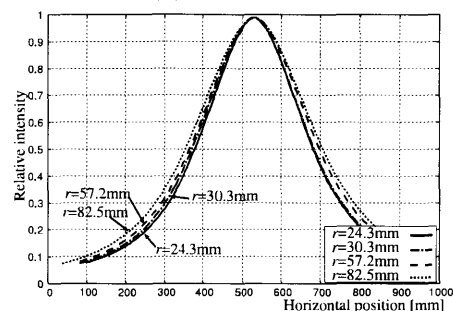
(b) $r=30.3\text{mm}$



(c) $r=57.2\text{mm}$



(d) $r=82.5\text{mm}$



(e) Comparison of fitted theoretical formula of reflected intensity

Fig.4.21. Observed value and fitted curve of reflected intensity.

第5章

結論

5.1 本論文の総括

本研究では、地中レーダ画像からの埋設管の敷設状況を認識することを目的として、様々な手法を提案した。第3章では、比誘電率を既知のものとして扱い、埋設管までの伝搬時間から、管半径、埋設位置を解析的に推定する手法を提案した。更に地中レーダにおける計測において、計測誤差の主要因である伝搬時間の計測誤差と比誘電率の設定誤差が、管半径の推定値に与える影響を解析した。

第4章では、地中レーダから観測される情報として、埋設管までの伝搬時間だけでなく、埋設管からの反射波の観測強度も利用することで、今まで困難であった管半径と比誘電率の同時推定を行う手法を提案した。具体的には、反射強度は、管の散乱断面積だけでなく、媒質内での減衰、管と媒質との相対的な電気定数差など、多数の要因により決定されるものであるため、反射強度の情報は活用できていなかった。そこで、本研究では、埋設管半径以外の要因による影響を抑制するため、埋設管直上における最大振幅で、観測強度を正規化する手法を導入した。これによって、反射強度のデータから、埋設管半径を直接的に反映する情報を抽出することに成功した。

これらの手法を用いることで、埋設管半径や正確な埋設位置などを把握することができ、施工図面などと照らし合わせることで、対象となる埋設管を認識するのに有効であると考えられる。

5.2 今後の課題

本研究に関して、残された課題を以下に列挙する。

1. 不均一な土媒質における本手法の適用

本手法は前提条件として、土媒質は、線形性（電界や磁界の大きさによらない）、等方性（電界や磁界の方向によらない）、非分散性（電界や磁界の角周波数によらない）、均質性（アンテナの位置によらない）であることを仮定している。しかし、地中レーダが対象とする土壌を媒質と考えた場合、これらの媒質に関する仮定が必ずしも成立すると

は限らない。今後は、これらの前提条件以外の場合においても、本手法を適用できるよう拡張する必要がある。

2. 埋設管の任意の敷設方向への適用

本手法は、埋設管に対し、垂直に走査することを前提としているため、二次元問題として扱ってきた。しかし、実際には、埋設管の敷設方向にも誤差が生じることが考えられる。その計測誤差が管半径推定値などに与える影響を解析する必要がある。

参考文献

- [1] 神代晃治, 藤井邦男, "埋設管マッピングシステムを用いた地下埋設物の三次元非破壊探査の精度検証結果について," 第19回日本非開削技術研究発表会論文集, 2008.
- [2] 永島裕二, 増田順一, 山内寛紀, "地下埋設物探知におけるパターン認識技術と, その信号処理の高速化の研究," 信学論 (C-II), vol.J74-C-II, pp.317-324, May. 1991.
- [3] T.Suzuki and I.Arai, "Advance on underground radars," IEICE Trans. vol. E-74, no.2, pp.289-293, Feb. 1991.
- [4] 佐藤亨, 坂本卓也, "UWB パルスレーダによる物体像再構成アルゴリズム," 信学論 (B), vol.J88-B, no.12, pp.2311-2325, Dec. 2005.
- [5] 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, pp.520-530, July. 2002.
- [6] Jia. H, T. Takenaka, T. Tanaka, "Time-domain inverse scattering method for cross-borehole radar imaging," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.40, no.7, pp.1640-1647, Jul. 2002.
- [7] 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.J79-B-II, no.9, pp.589-599, Sept. 1996.
- [8] C.J. Leuschen, R.G. Plumb, "A matched-filter-based reverse-time migration algorithm for ground-penetrating radar data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.39, no.5, pp.929-936, May. 2001.
- [9] 田中正行, 高山潤也, 大山真司, 小林彬, "マイクロ波地中レーダのためのモデル適応度による伝搬時間推定," 計測自動制御学会論文集, vol.39, no.4, pp.332-341, Apr. 2003.
- [10] 高山潤也, 田中隆行, 早川輝, 大山真司, 小林彬, "コンクリート構造物の診断・評価のための鉄筋および配管の位置・径推定と材質弁別," 計測自動制御学会論文集, vol.43, no.9, pp.741-748, Sept. 2007.
- [11] Toru KANEKO, "Radar Image Processing for Locating Underground Linear Objects," IEICE Trans. Inf.&Syst., vol.E74-D, no.10, pp.3451-3458, Oct. 1991.
- [12] 永島裕二, 吉田浩隆, 増田順一, 小松幸二, "ゼロクロス合成開口法を用いた埋設管位置推定法," 信学論 (B-II), vol.J76-B-II, no.7, pp.634-640, July. 1993.
- [13] K.Takahashi and M.Sato, "Parametric inversion technique for location of cylindrical structures by cross-hole measurements," IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.,

- vol.44, no.11, pp.3348-3355, Nov. 2006.
- [14] 脇田喜之, 山田寛喜, 山口芳雄, "ダイポールアンテナを用いた土壤の媒質定数の推定法," 信学論 (B-II), vol.J81-B-II, no.8, pp.797-804, Aug. 1998.
- [15] 若林正樹, 田中正吾, "電磁波レーダを用いた鉄筋の深度及び径の計測に関する一考察," 非破壊検査, vol.56, no.7, pp.364-370, July. 2007.
- [16] 田中正吾, 若林正樹, 大出康貴, 岡本昌幸, "電磁波レーダを用いた埋設管の被りおよび径の計測," 計測自動制御学会論文集, vol.44, no.8, pp.629-638, Aug. 2008.
- [17] 雨宮好文, 現代電磁波工学, オーム社, 1985.

本研究に関する論文リスト

原著論文

- [18] 小瀧裕史, 野村由司彦, 西口仁視, 松井博和, ”地中レーダによる観測画像からの埋設管半径の推定とその誤差解析,” 電子情報通信学会論文誌 (B), vol.J91-B, no.9, pp.1104-1112, Sept. 2008.
- [19] 小瀧裕史, 野村由司彦, 加藤典彦, 松井博和, ”地中レーダによる比誘電率と埋設管半径の同時推定,” 電子情報通信学会論文誌 (B), 条件付き採録

国際会議発表論文

- [20] Hirofumi Kotaki, Yoshihiko Nomura, Hirokazu Fujii, Yoshikazu Sudo, ”Synthetic Aperture Method for GPR Considering Depth-Changed Shape of Reflected Waveform,” Proceedings of IS&T/SPIE Intelligent Robots and Computer Vision XXVI: Algorithms, Techniques, and Active Vision, San Jose, USA, 2009.

口頭発表論文

- [21] 小瀧裕史, 野村由司彦, ”地中レーダによる地下断面映像からの埋設管径推定法,” 2007年度機械学会年次大会, vol.7, pp.261-262, Sept. 2007.
- [22] 小瀧裕史, 野村由司彦, 松井博和, ”地中レーダの計測誤差に起因する埋設管径推定誤差の解析,” 平成 19 年三重地区計測制御研究講演会講演論文集, pp.A1-1-A.1-4, Dec. 2007.
- [23] 小瀧裕史, 野村由司彦, 藤井宏和, 須藤佳一, ”伝達関数の形状変化に基づくマルチセクタ処理を用いた合成開口法,” 平成 20 年三重地区計測制御研究講演会講演論文集, pp.A-10-A10-4, Dec. 2008.

謝辞

本研究にあたり、終始適切なご指導を頂き、熱心に御討論頂きました三重大学大学院工学研究科 野村由司彦 教授に深く感謝いたします。先生との衝撃的な出会いから3年間、少しでも多くのことを先生から学ぼうと必至に研究に取り組んだおかげで、納得のできる研究成果を収めることができたと考えています。先生のご指導なしには、とてもここまで到達することは叶わなかったと思います。

また、研究を行う上で数多くの貴重なアドバイスやデータを御提供いただきました、アイレック技建株式会社 須藤佳一博士にも深く御礼を申し上げます。

三重大学大学院工学研究科 加藤典彦 准教授、三重大学大学院工学研究科 松井博和 助教には、研究を行う上で必要となる知識や姿勢などについて御指導を頂きました。それぞれの皆様に深く御礼を申し上げます。修士論文の副査をお願いしました小久保尚躬先生には、企業人の視点から研究への取り組み方などをご指導いただき、大変勉強になりました。ここに深く感謝申し上げます。

三重大学メカトロニクス研究室で、本研究と一緒に進めてきた、高木耕平君、長沼陽一君には特に深く感謝します。高木君には、地中レーダの実験を行うにあたり、ハードウェアの製作で多くの助けを得ました。あと最後のプレゼントは、本当にうれしく思いました。ありがとうございます。長沼君には、地中レーダの実験を行う上で、多大なるご尽力を尽くしてもらい、深く感謝します。深夜まで一緒に土を掘ってくれて本当にありがとうございました。その精神力と忍耐強さには、感服しました。

メカトロニクス研究室に所属していた先輩、同輩、後輩の皆様には研究室での公式・非公式の活動を通じて、多くの刺激と楽しさをいただきました。ありがとうございます。皆様のさらなるご活躍を期待しております。

多くの友人、先生方に恵まれ、有意義に学生生活を満喫できたことをうれしく思います。最後に、長い間温かく支えていただいた家族に感謝致します。

付録 A

各未知パラメータの誤差の検討

水平位置 l_u は、他の未知パラメータとほぼ相関がないことから、分離して考えることができる。よって、水平位置の分散 $\sigma_{l_u}^2$ は、単純に総和演算の逆数をとることで

$$\sigma_{l_u}^2 = \frac{\sigma_y^2}{\sum \left(\frac{\partial y_i}{\partial l_u} \right)^2} = \frac{\Delta u}{2L_d} \cdot \left(\frac{c_0}{2\sqrt{\epsilon}} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\tan \theta_n - \theta_n)} \cdot \sigma_y^2 \quad (\text{A.1})$$

と求めることができる。式 (3.19), (3.20), (A.1) より、片側合成開口角を変化させたときの各未知パラメータの分散の大小関係を Fig.A.1 に示す。このとき、表 4.1 に示す条件を用いた。

図より、片側合成開口角 $\theta_n = 50^\circ$ 以下においては、 $\sigma_{\hat{r}}^2 > \sigma_{l_u}^2 > \sigma_{l_d}^2$ となることがわかる。これは、頂点の近傍では、擬似双曲線は、ほぼ水平となり、非常に曲率が小さい弧を呈す。そのため、ばらつきとして誤差を含むような伝搬時間のデータに擬似双曲線を当てはめたとき、当てはめの範囲が頂点に近いほど、頂点の水平位置の推定値は、埋設深さに比べ、より大きくばらつくと考えられる。その一方で、当てはめの範囲が広がるほど、埋設深さの推定値が、頂点の水平位置より大きくばらつくことになる。しかし、実際には比誘電率の設定誤差も考慮しなければならないが、それは埋設深さにのみ誤差をもたらす、水平位置には影響を与えない。このような意味で、水平位置と埋設深さの誤差の大小を一概に論じることはできない。

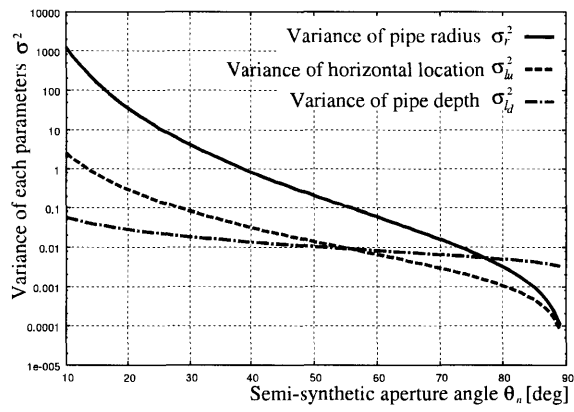


Fig.A.1. Relationship between theoretical variance of each parameters and semi-synthetic aperture angle θ_n .