

偏波特性を利用した地中レーダ探査法による浅部地下構造の推定精度向上

飛田 和輝*・久保 大樹**・小池 克明**

Improving the estimation accuracy of shallow subsurface structures using a ground penetrating radar exploration method with polarization properties

Kazuki Tobita*, Taiki Kubo** and Katsuaki Koike**

*東京ガス株式会社 Tokyo Gas Co., Ltd., 1-5-20 Kaigan, Minato-ku, Tokyo 105-8527, Japan.
**京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management,
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: kubo.taiki.3n@kyoto-u.ac.jp (Kubo)

キーワード：空洞検知，非破壊調査，比誘電率，透過測定，埋設管

Key words: Cavity detection, Non-Destructive Inspection, Relative permittivity, Transmission method, Underground pipe

1. はじめに

近年，我が国では高度経済成長期に集中的に整備されたインフラの老朽化が急速に進行し，それに起因する事故が多数報告されている．地中レーダ探査 (Ground Penetrating Radar: GPR) は，浅部地下構造を高分解能で非破壊的に把握できる手法として広く利用されているが，一般的には反射波の到達時間の情報に基づく位置情報の推定にとどまり，反射体の形状や向き，さらには周辺地盤の物性評価までを同時に行うことは容易ではない．特に，陥没事故の予兆となる地盤内の水分量の変化を捉えるためには，体積含水率と密接な関係にある媒質の比誘電率を正確に推定する必要があるが，既存の研究は定性的な判定にとどまっており，具体的な比誘電率の算出には至っていない．

そこで本研究では，浅部地下構造の推定精度向上のため，送信アンテナと受信アンテナを分離し，透過波と複数の偏波を計測可能な地中レーダシステム POGRA (Polarimetry Ground penetration RADar System) を用いた手法について検討を行う．POGRA は送受信分離型のアンテナを採用し，回転による複数の偏波情報の取得のほか，反射波に加えて透過波の観測も可能である．本研究では実際に POGRA を用いた実験を行い，透過波の解析による比誘電率の高精度な算出手法の検証，ならびに偏波情報 (TE 波・TM 波) を利用した浅部地下構造推定の有効性について明らかにした．

2. POGRA の概要と基礎特性の評価

本研究で用いた地中レーダシステム「POGRA」(第1図) は，送受アンテナと受信アンテナが独立しており，入射面に垂直な電界を持つ TE 波 (水平偏波) と，入射面内に電界を持つ TM 波 (垂直偏波) を選択的に計測できる．まず POGRA の基礎特性を把握するため，正対させた送受信アンテナ間の距離を 0.2~2.0 m まで 0.2 m 刻みで変化させ，伝播速度とレーダ立ち上がり特性の検証を行った．各距離において計測された代表的な受信波形と読み取り値に基づき作成したアンテナ間隔と走時の関係を第2図に示す．

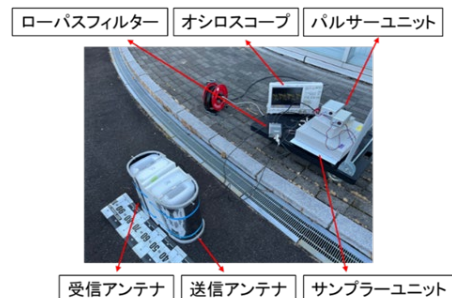
グラフの傾きから，伝播速度 $v_0=1.98 \times 10^8$ m/s と求められ，距離 0 における切片は 7.26 ns であった．これらの値は測定環境に起因するものではなく，システム内部の同軸

ケーブルの伝搬特性によるものと考えられる．したがって，以降の実験では，これらの値を補正值として採用した．

3. 透過波を用いた比誘電率の推定

物性値が既知である均質な媒質を対象に透過型の手法を適用し，厚さと遅延時間から比誘電率を推定し，妥当性を検証した．水槽を用いた実験では，水深を 1 cm から 5 cm まで変化させて透過波の到達時間の変化を計測した．水深と透過波の到達時間の関係から回帰直線を算出し，求められた比誘電率は理論値と比べて誤差 5.7% となり高い精度であった．また，厚さ 25 cm の屋外のコンクリート構造物を対象に計測した結果，比誘電率は 11.5 と求められた．乾燥したコンクリートの一般的な値よりも高くなったが，内部が湿気を含んでいた可能性や，電磁波が鉄筋を迂回して伝搬した影響が大きいと考えられる．湿潤状態のコンクリートの比誘電率の範囲内には収まっていることから，実構造物の計測値として妥当な結果であると判断した．

次に，比誘電率が未知かつ変動する不均質な媒質に対する透過型の手法の有効性を検証するため，内部に水分を保持可能なポリウレタンフォームを模擬地盤として用いた実験を行った．体積含水率が 5% から 30% まで 5% 刻みで均等に注水を行い，各体積含水率において取得した透過波の波形から伝播時間を読み取り，比誘電率を算出した．結果を見ると，体積含水率が増加するのに伴って計算された比誘電率も増加していく傾向が確認された．土壌の体積含水率と



第1図 地中レーダシステム POGRA の構成

比誘電率の関係を示す経験式である Topp の式 (Topp *et al.*, 1980) と比較すると、含水率が小さい状態においては両者はよく対応したが、含水率が増加するにつれて乖離がみられる結果となった (第 3 図)。これは、主に媒質の違いに起因すると考えられる。この結果から、漏水の発生初期などの含水率が低い段階において、透過波を用いて浅部地下構造の水分量の変化を定量的に評価可能であると考えられる。

4. 偏波および反射情報を利用した地下構造の推定

4.1 偏波特性を利用した埋設金属管の向きの推定

ウレタンフォーム中に金属管を設置し、アンテナの偏波面と金属管の軸のなす角度を 0° , 45° , 90° と変化させて透過型の配置で計測を行った。金属管がない状態の波形を基準波形として各角度の波形から差し引くことで反射体由来の波形成分を抽出した (第 4 図)。電界ベクトルが管と平行な 0° の場合に最も振幅が大きな反射波が観測され、直交する 90° の場合には反射波はほとんど確認されなかった。これは電界が管と平行な場合にのみ効率的に誘導電流が励起されて強い散乱波が発生するためであり (Balanis, 2016), POGRA の偏波特性を利用することで、単に埋設物の有無だけでなく、形状や向きの推定も可能であることが実証された。

4.2 TE/TM 波における反射特性の比較と空洞検知

アスファルト路面にてアンテナ間距離を変化させるワイドアングル測定を実施した。TM 波では、アンテナ間距離が離れて入射角が大きくなるにつれて反射波の振幅が急激に減衰し、反射波の識別が困難となった。これは TM 波には反射係数がゼロとなるブリュースター角が存在するためである。一方、TE 波では TM 波に比べて距離が離れても反射波は比較的明瞭に保たれていたため、空洞の検知には TE 波を用いることとした。

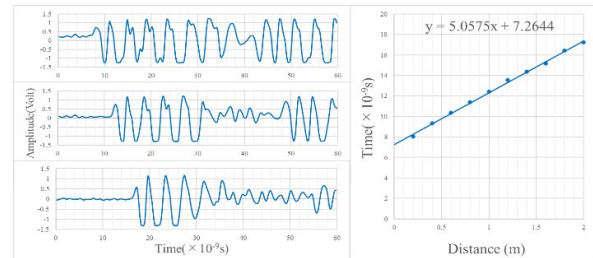
次に、路面下に暗渠があり、深度 75 cm 地点に空洞が存在する屋外の路面で計測を行った。「空洞あり」と「空洞なし」の二地点で、アンテナ間隔を 0.4 m, 0.8 m, 1.2 m と変化させて TE 波の波形を取得した。「空洞なし」地点の波形を基準波形として各波形から差し引くことで、空洞による反射波由来の波形成分を抽出した (第 5 図)。アンテナ間隔 0.4 m では目立った振幅の変化は見られなかったが、間隔を 0.8 m および 1.2 m に広げた場合は、18~26 ns の区間に他と比較して振幅の大きい特徴的な波形が出現した。この波形が出現した時間は、深度 75 cm の空洞までの往復走時と整合している。これは、アンテナ間隔を広げたことで入射角が大きくなり、空洞の境界面で全反射に近い強い反射が起きたためと考えられる。この結果から、TE 波の反射波形を用いて地下の空洞を検知できることを確認した。実際の現場への適用に向けては、距離による電磁波の減衰を考慮した最適なアンテナ間隔の選定や、地盤のばらつきの影響を取り除く処理の確立が必要である。

5. まとめ

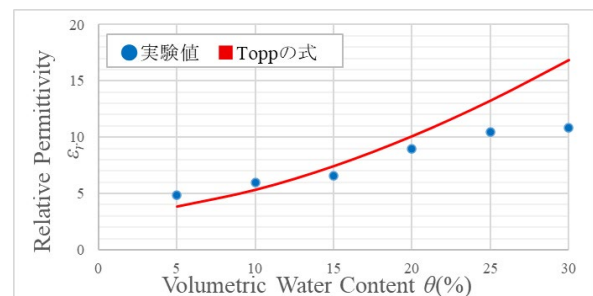
本研究では、地下構造の「位置」だけでなく「物性」や「詳細な形状」を定量的に評価するため、POGRA を用いた複数の探査手法を検討した。まず、透過波の遅延時間から算出された含水試料の比誘電率は Topp の式と良好に一致し、地盤や構造物の比誘電率の推定に有効であることを示した。次に、管の軸方向とアンテナの電界ベクトルが平行な場合に振幅が最大となる現象を利用し、単なる埋設物の有無だけでなく、形状や向きの推定も可能であることを実証した。さらに、距離が離れても反射波が比較的明瞭な TE 波を利用し、一定の精度で空洞の検知に成功した。今後は FDTD 法

による数値シミュレーション等の検討を加えることで、現場の複雑な地盤構造に対する適用性を高めていく。

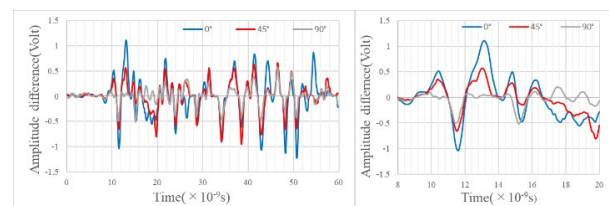
謝辞: 装置のセッティングやデータの解釈について多大なご協力とご助言を賜りました州計測器株式会社の吉田雄司様および兵庫県立大学の後藤忠則教授に深く御礼申し上げます。



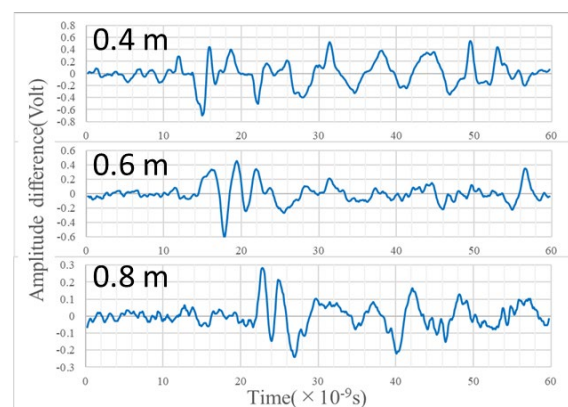
第 2 図 受信波形およびアンテナ間隔と走時の関係



第 3 図 体積含水率と比誘電率の関係



第 4 図 偏波面の回転角ごとの金属管波形



第 5 図 基準波形除去後の各アンテナ間隔での波形

文献

- Balanis, C. A. (2016) *Antenna Theory: Analysis and Design (4th Edition)*, Wiley, 1104p.
- Topp, G. C., Davis, J. L. and Anna, A. P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol.16, no.3, pp. 574–582.