

音波を用いた極浅層地中探査

—超音波を用いた冠水土壤中の映像化の検討—

瀬尾 邦彦¹⁾・白川 貴志²⁾・杉本 恒美²⁾

桐蔭横浜大学工学部

(2009 年 3 月 7 日 受理)

概要

現在数多くのプラスチック製地雷が埋設されたまま存在しているという問題がある。本研究では雨季のカンボジアなどの冠水した土壌での地雷の探査を目的として、水中にて有効に伝搬する音波を使用した極浅層領域の地中映像化実験を行う。市販の魚群探知機用の超音波振動子と直接波の伝搬を防ぐ遮蔽板を使用した探査装置を作成し、室内実験と屋外実験にて地中映像化の検討を行った。冠水水槽を使用した室内実験では深度 10cm に埋設された中空プラスチック容器・エポキシ樹脂製模型からの反応が映像中から確認された。水田での屋外実験では中空容器の映像化に成功した一方、エポキシ樹脂模型からの映像はぼやけた結果となった。このことから条件による超音波による冠水土壤中の映像化および遮蔽板を用いた手法により極浅層部分の探査が可能になることが判明した。実際の土壌にて埋設物を確実に探知するためには、さらにハイパワーアンプの使用やデジタル信号処理が必要であると考えられる。

1 はじめに

現在世界には数多くの地雷が埋設されたま

まになっている。それらを取り除く方法としては、金属探知機や地中レーダ、電気探査など様々な手段が用いられている。しかしこれらの電磁波等を利用した手法では、雨季のカンボジアなどの雨で地面が冠水した土壌での探査が困難となるという問題が存在する。そのため冠水土壌などの水を多く含む土地においては有利に伝搬する音波による探査が有効であると考えられる。冠水土壤中での音波伝搬モデルとしては、Biot、Stoll による多孔質媒質中のモデルである Biot-Stoll モデルが存在する^[1,2]。さらに東海大学の木村正雄教授によって Biot-Stoll モデルを使用した未固結海底堆積物中の音波伝搬が研究されている^[3]。しかし Biot-Stoll モデルは 13 個の独立したパラメーターが必要であり、種々の土壌において実際に以上の式を適用することは困難である。そこで冠水土壤中での音波伝搬として、実際に冠水土壌を想定した水槽を使用した音波による地中探査が検討されてきた^[4,6]。本研究では地雷探査を目的とした冠水土壤中での極浅層領域の地中探査法について検討を行う。

2 探査装置と映像化方法

Kunihiko Seo¹⁾: Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama
Takashi Shirakawa²⁾, Tsuneyoshi Sugimoto²⁾: Department of Electronics and Information Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama, 225-8502

本研究では地雷探査を目的としているため、冠水土壤中の地中数 cm ～十数 cm 程度の極浅層領域を探査対象とする。通常地中探査では可聴領域の周波数帯が用いられるが、可聴帯での単一振動子を使用した反射法による B-mode 映像化法の場合、振動子への入力電圧と極近距離からの反射波が重なり映像化が困難になるという問題が発生する。そのため本研究では超音波を使用し、また送信器と受信器を分離した探査装置を作成することにより極浅層部領域の映像化を試みた。Fig.1

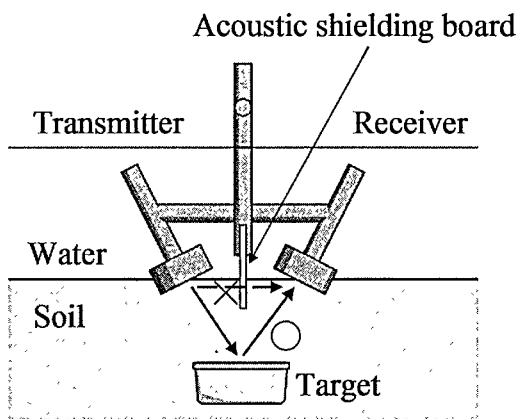


Fig. 1. Appearance of the device which use the transducers and the acoustic shielding board.

に作成した探査装置の概略を示す。超音波振動子として、市販の魚群探知機で用いられる共振周波数 120kHz の振動子 (SONIX、TW-05、PZT 型) を使用した。装置に固定された振動子の角度が調節可能であり、本研究では焦点を地中 10cm に調節して実験を行った。また 2 つの振動子間には直接波の伝搬を遮断するための遮蔽板 (発泡スチロール製) を設置した。遮蔽板の厚さは約 6mm である。遮蔽板の厚さについて、120kHz の超音波を使用し、またこれまでの研究から冠水土壤中の音速を 1500m/s 程度と仮定した場合、超音波の波長は 12.5mm となり、約 6mm の遮蔽板により超音波の伝搬が遮断されると考えられる。遮蔽板の有効性につい

て、黒土を用いた冠水土壤中の深度 10cm 地点に埋設された埋設物からの反射波を測定した結果を Fig.2 に示す。図中 (a) は遮蔽

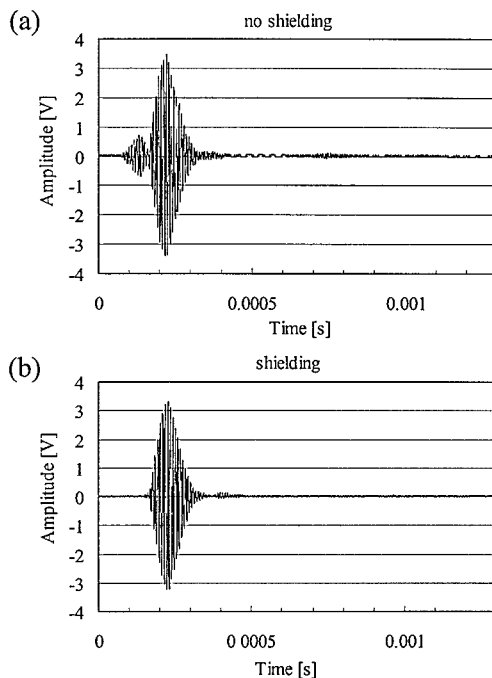


Fig. 2. The effect of the acoustic shielding board. (a) is recorded without shielding board. (b) is recorded with shielding board.

て、黒土を用いた冠水土壤中の深度 10cm 地点に埋設された埋設物からの反射波を測定した結果を Fig.2 に示す。図中 (a) は遮蔽板を設置せずに測定した結果、(b) は遮蔽板を設置して測定した結果である。遮蔽板の設置により、0.0001s 付近の直接波が除去された。本研究ではこの探査装置を使用し、送信信号として 120kHz 7 波のバースト波形を用いた。波形の作製には任意波形発生器 (Tektronix AFG 3022) を使用し、送信波形の増幅には超音波アンプ (ENI 2100L) を使用した。振動子へ印加される実行パワーは約 15W であった。

次に冠水土壤中の探査方法として、B-mode 映像化方法を用いて映像化を行う。具体的な探査方法としては振動子の振動面を地表面に押し当てて下方に超音波を放射し、地中埋設物からの反射波を測定することで映像化を行う。このとき、受信波形中の時間の

値と反射体の埋設深度は以下のような関係式で表される。

$$Z = \sqrt{\left(\frac{vt}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (1)$$

ここで Z は地中における深度 [m]、 d は送信器と受信器の距離、 v は音速 (1500m/s) である。地表面上の各位置での波形を測定するために、振動子を手で走査し探査を行う。得られた各地点でのデータに対して上の式を適用して地中の2次元・3次元の映像化を行う。2次元の映像化方法としては地表面を線状に走査し、得られた波形について上の式により時間軸を深度に変換し、そして振幅値を反射物の存在を表す輝度に変換する。反射物の存在分布は Graph-R (伊藤徹、フリーグラフソフト) で表示される。次に3次元映像化方法として、地表面上で振動子を2次元的に走査し、上記式にて変換を行う。そして MicroAVS (KGT Inc., MicroAVS 3.0) を使用し、3次元中の振幅値の分布から、同数値の点を繋ぎ等数値面 (等高面) として表示して埋設物の形状を立体として表示する。また本研究での探査方法として、振動子とその間に設置された遮蔽板を地中に1~2cm程度挿入して測定を行っている。本研究では地雷の探査を最終目的として検討を行っているが、探知の対象となる対人地雷は人が踏むことで起爆するため、遮蔽板が接触した程度では起爆しないと考えて探査方法の検討を行っている。

3 室内での映像化実験

研究室にて、砂を用いた冠土壌水槽中の映像化実験を行った。砂の粒径は200~300 μ m前後であり、水深6cm程度の冠水状態とした。探査領域は地表面上40cm×32cmとし、探査対象 (中空プラスチック容器、10×15×4cm) を地表面からの深度10cm地点に埋設した。探査領域と計測地点を Fig.3 に示す。振動子を4cm間隔で走査し、

それぞれの地点にて伝搬波形を記録した。送信信号には120kHz 7波のバースト波形を用いた。受信波形のうち、 $X=20$ cm地点 (Fig.3 図中 (20,0)~(20,40)) での波形を Fig.4 に示す。図中の最上段の波形は送信波形を示

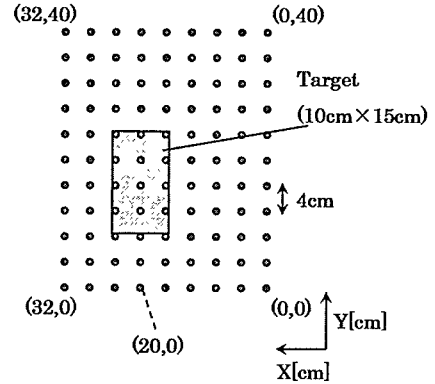


Fig. 3. Exploration area and measurement location for an indoor exploration.

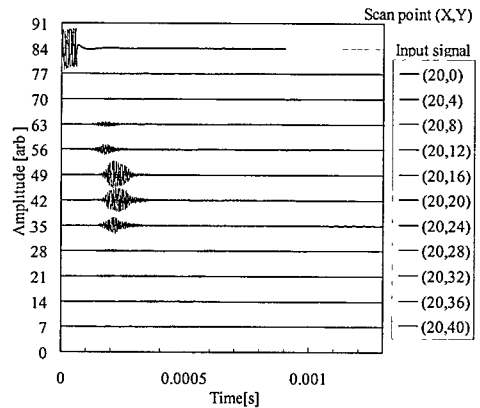


Fig. 4. Received waves at each point ($X=20$). Wave drawn at upside is the input signal.

している。また、(20,8)~(20,24)での波形は埋設物からの反射波を含んでいると考えられる。これらのデータを使用して映像化を行った結果を Fig.5 に示す。図中の (a) は MicroAVS により振幅の等高面表示と $X=20$ 地点の断面図を同時に表示したものである。

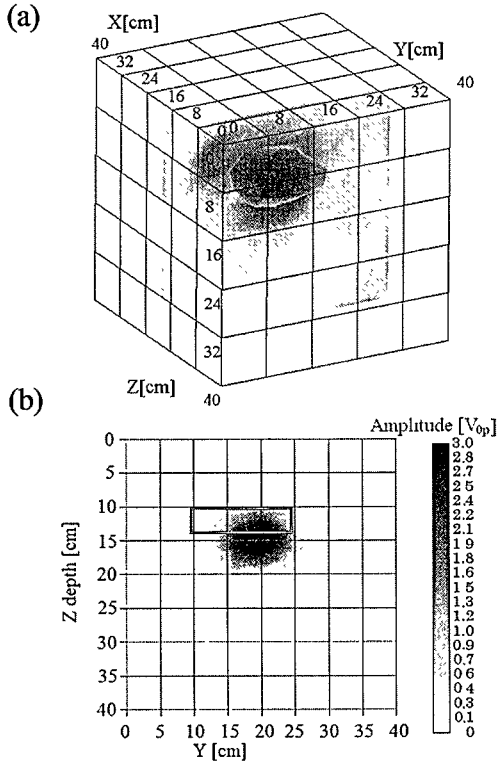


Fig. 5. Calculated images of underground. Buried target is a hollow plastic container. (a) Calculated 3D image. Same value points in amplitude are connected as a flat surface. (b) Cross sectional image (X=20) of underground.

Z軸は地表面からの深度を表している。図中の立体により、対象の埋設位置とおおまかな埋設位置が表されている。図中 (b) は X=20 地点の断面図である。振動子が埋設物の上部に置かれて記録された波形中に、強い振幅を持った反射波が観測され、結果として断面図中の四角で表される埋設位置にて強い反応が確認された。これにより Fig.5 中で対象のおおまかな埋設位置が表された。次に埋設物の材質と埋設深度を変更して同様の映像化実験を行った。探査対象として、エポキシ樹脂製の地雷模型を深度 10cm 地点に、中空プラスチック容器を深度 10cm 地点、15cm 地点に埋設した。映像化結果の図を Fig.6 に示す。3つの埋設物のうち、エポキシ樹脂製

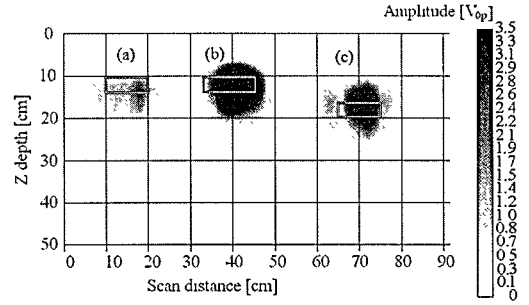


Fig. 6. Cross sectional image of underground. Materials and buried depth Z[cm] are (a) epoxy resin model, 10 cm. (b) hollow container, 10 cm. (c) hollow container, 15 cm.

の模型からはもっとも弱い反射波が観測された。結果として、材質の変化、また埋設深度の増加により反射波の振幅が変化するが同様に映像化が可能であると考えられる。

4 水田での映像化実験

室内実験の後に、水田にて同様の映像化実験を行った。探査対象として、深度 15cm 地点に中空プラスチック容器、深度 18cm 地点にエポキシ樹脂製の地雷模型を埋設した。探査方法として振動子を 5cm 間隔で線状に走査し、それぞれの探査対象を中心に 80cm の領域を映像化した。中空プラスチック容器の映像化結果を Fig.7 に、エポキシ樹脂製地雷模型の結果を Fig.8 に示す。結果として、中空容器は明瞭に判別できる程度に映像化された。一方、樹脂製模型は他の波に埋もればやけた映像が作成された。この原因として、Fig.5 と Fig.7 の振幅のグレースケールバーで現されるように水田での探査実験では室内実験に比べ反射波の振幅が小さくなっていることがあげられる。これは実際の水田の土壌は土の状態が不均一であり、また土壌中に多くの気泡が含まれているため地中を伝わる超音波が室内に比べて大きく減衰・散乱したためであると考えられる。

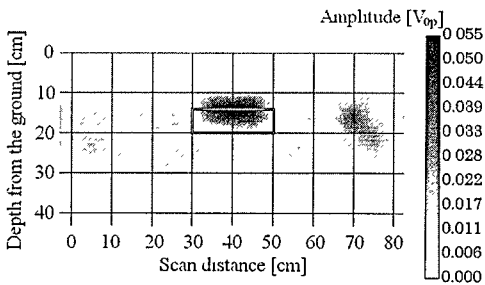


Fig. 7. An underground image in the paddy field. A hollow plastic container is buried at 15 cm in the depth.

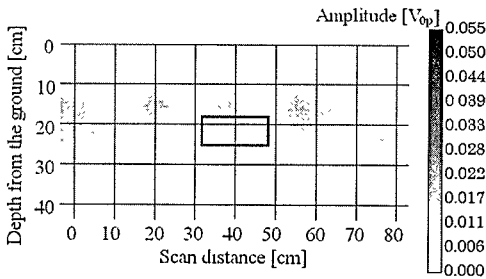


Fig. 8. An underground image in the paddy field. An epoxy resin model is buried at 18 cm in the depth.

5 考察と今後の課題

室内実験では土壌が伝搬に理想的な状態であったため、深度 10cm 地点に埋設された中空容器は映像中で強い反応を示していた。またエポキシ樹脂製模型は中空容器に比べ振幅が弱い、映像中で埋設位置が判別可能な程度の反応が確認された。その一方、水田の実験では土壌が不均一で気泡が含有されており、中空容器は明瞭に映像化され、エポキシ樹脂模型の映像はぼやけたものとなった。この問題を解決するためにはよりハイパワーなアンプの使用やプリアンプの使用が有効であると考えられる。また受信される反射波の振

幅の補償として周波数フィルタや減衰補正などのデジタル信号処理による補償処理も有効であると考えられる。そのため今後はこれらの対策により、冠水土壤中に存在する埋設物を確実に探知することが課題である。さらに装置を小型化し、また測定精度を上げることでより埋設物の外形を推定することや、より小さな対象を映像化することも可能になると考えられる。

6 結論

結論として、超音波振動子を使用して冠水土壤中の映像化に成功した。また遮蔽板を用いた探査装置により、冠水土壤中の極浅層領域の探査が可能になると考えられる。今後の課題として、減衰が激しい実際の土壌にて埋設物を確実に探知するために、ハイパワーのアンプやプリアンプの使用・信号処理による減衰補正などが有効であると考えられる。

References

- 1) M.A.Biot, Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range, J.Acoust. Soc.Am, 28 (1956) 168-178.
- 2) M.A.Biot, Theory of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. High frequency range, J.Acoust.Soc.Am, 28 (1956) 179-191.
- 3) M.Kimura, Basics of marine acoustics - unconsolidated sediment -, The Marine Acoustics of Japan, Text of the 9th technical seminar (2001) (in Japanese)
- 4) K.Seo, T.Shirakawa and T. Sugimoto, Proc. of The 19th ICA (2007), ULT-10-018.
- 5) K.Seo, T.Shirakawa and T. Sugimoto, Proc. Symp. Ultrason. Electron., 28 (2007), pp.225-226.
- 6) K.Seo, T.Shirakawa and T. Sugimoto, Proc. of Acoustics '08, pp6477-6481.