

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月30日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560451

研究課題名（和文） 弾性波を用いた埋設物探査のための地中映像化

研究課題名（英文） Underground Imaging for Buried Objects Using Elastic Wave

研究代表者

陶 良（TOH RYO）

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：60327161

研究成果の概要（和文）：探査実験とシミュレーションをそれぞれ行い、電磁誘導型音源と振幅相関合成処理を併用した映像化方法における横方向の有効探査範囲および適切な受波器アレーの配置方法についてそれぞれ検討した結果、横方向探査能力は音源の中心軸から指向角 35° 程度以内であること、円形受波器アレーを用いることで虚像を有効に抑制できることを明らかにした。更に地表音速と地中音速の関係について実験的に検討し、地表音速は地中縦波速度の85%程度である結果を得た。

研究成果の概要（英文）：The lateral detecting ability and the proper arrangement of receivers array of three dimensional amplitude correlation synthesis processing method for imaging objects buried underground are studied by both numerical simulation and experiment, respectively. The results show that the lateral detection of the imaging method is efficient for spread angles from the sound source of less than about 35° , and that the circular type receivers array is effective for reducing error images. Moreover, the relation between sound velocity measured from ground surface and that measured from underground is studied experimentally, where the result shows that the sound velocity measured from ground surface is about 85% of the velocity of longitudinal wave underground.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム・地中探査・弾性波・映像化・振幅相関合成

1. 研究開始当初の背景

日本の各地には石器時代からの埋蔵遺跡が数多く散在し、このような埋蔵文化財を包蔵する土地に対して宅地や工場地の造成、道路の建設などが行なわれ、そのために土木工事に先立って埋蔵遺跡を調査する機会が多くなってきた。また、土木工事を行う場合、予

め地下に埋設されている電気ケーブル、水道管、ガス管の状況を把握することが事故防止の面で重要である。したがって、比較的容易に地下埋設物を非破壊的に探査する技術の開発が望まれている。

地下埋設管や埋蔵遺跡の探査を行う場合、地中探査レーダ、磁気探査及び電気探査が有

効であると考えられているが、電解物質の多い土壌中や含水率の高い場所などでは、電磁波の減衰が大きいためその適用が困難である。このような土砂中の探査には、音波による弾性波探査が有効であると考えられている。この方法は、音源と受波器を地表面に配置し、音源から地中に音波を放射し、地中の音響的不連続なところからの反射信号を受信し、これに信号処理を施す事により地中を映像化するものである。

埋蔵遺跡及び地下埋設物の多くは埋設（蔵）状況から考え、地表面下数メートル程度と極めて浅いため、地中表層部に対して高分解能を持つ探査方法が要求される。しかし、探査深度が浅い場合、被探査物からの反射波と地表面を伝搬してくる直接波が重畳し、地中映像の作成が困難となりがちである。一方、土砂中では高周波の音波減衰量が大きいため、数百 Hz 以下の反射信号しか受信されないことが実験より明らかにされている。そのため、SN 比がよく、出来る限りパルス幅の狭い反射信号を受信するために、受信できる上限の主周波数成分に合わせたインパルス音波の放射が可能でインパルス音源、および分解能が良く虚像の少ない地中埋設（蔵）物の映像が得られる映像化処理方法がそれぞれ必要であり、地中映像化技術における重要な要素である。

そこで、本研究グループは、送信パルスが安定で再現性があること、地中に大勢力のインパルス音波の放射が可能であること、送波パルスの主周波数成分が比較的容易に制御できること、構造が簡単で取り扱い操作が比較的容易であること等の各条件を兼ね備えた地中探査用電磁誘導型インパルス音源を開発した[1, 2]。また、虚像の少ない地中映像を作成する方法として、受信出力の組合せを変えて、極性の一致した振幅の乗算を行い、それらを全て加算する特殊な振幅相関合成法を考案し、乗算の効果を用いて虚像の軽減をはかり、SN 比の良好な地中映像の作成方法の研究を進めてきた。[3, 4]

更に、音源を中心に、その前後左右 3 個ずつ計 12 個の受波器をクロスアレー型に配置し、地中埋設物から反射した 12 個の受信信号に三次元の信号処理を施すことにより、探査範囲内での地中全体を三次元的に映像化する方法を考案した。[5, 6]

今まで、基礎的研究として、シミュレーション及びモデル砂槽を用いた探査実験を行い、その有効性を明らかにしてきた。また、同一深度に埋設された 2 つの探査対象物は 1 波長程度以上の水平間隔があれば両者の分離識別が可能である結果が得ている。今後、実用化を目指し、音源の指向特性や信号処理の非線形歪みなどを考慮した音源・受波器アレーと埋設物の位置関係による影響、土砂媒

質などの探査環境の変化による影響などについて、更に検討する必要がある。

[1] 地下埋設物探査用電磁誘導形送波器, 本岡誠一, 奥島基良, 音響学会誌, V. 29, 403-409, 1973.

[2] 埋蔵文化財の音響探査に用いる電磁誘導型インパルス音源, 本岡誠一, 陶良, 音響学会誌, Vol. 58, 611-616, 2002.

[3] Ultrasonic underground imaging using amplitude correlation synthesizing method, L. Tao, T. Tanaka, T. Watanabe, and S. Motooka, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 38, 3148-3153, 1999.

[4] Imaging of underground interface using impulse ultrasound and amplitude correlation synthesis processing method, Y. Matsuo, L. Tao, T. Watanabe, and S. Motooka, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 41, 3539-3544, 2002.

[5] クロス型送・受波器アレーを用いた地中埋設物の 3 次元映像化, 陶良, 渡辺勉, 本岡誠一, 音響学会誌, Vol. 60, 727-734, 2004.

[6] The Lateral Resolution of Three-Dimensional Underground Imaging by Using Amplitude Correlation Synthesis Processing Method, Jpn. J. Appl. Phys., L. Tao, S. Motooka, Vol. 46, 4589-4594, 2007.

2. 研究の目的

本研究は、実用できる地中埋設物の探査技術の開発を目指し、以下のことを目的とする。

- (1) 音源の指向性による横方向の有効探査範囲を明らかにする。
- (2) 虚像の抑制に有効な受波器アレーの配置方法について検討する。
- (3) 実地探査の便利上、地表面で測定した音速より地中音速を推測する可能性について検討する。

3. 研究の方法

(1) 横方向の有効探査範囲について

電磁誘導型音源と振幅相関合成処理を併用した地中埋設物の 3 次元映像化方法を用いて、複数埋設物を対象としたシミュレーションと探査実験をそれぞれ行い、横方向映像化可能な範囲について検討した。

探査実験は、3m×3m×3m のモデル砂槽を用いて行った。砂槽中に 0.3m×0.3m×0.3m のコンクリートブロック 3 つを埋設した。3 つの埋設物は同一水平直線上にあり、間隔をそれぞれ 0.7m と 0.9m とした。音源からの指向角度の変化を検討するため、地表面に設置した音源とクロス型受波器アレーの位置を変化させて映像化探査実験を行った。更に、地表面を掘り下げることで埋設物深度を 1.5m と 1.3m それぞれとした。図 1 にその位置関

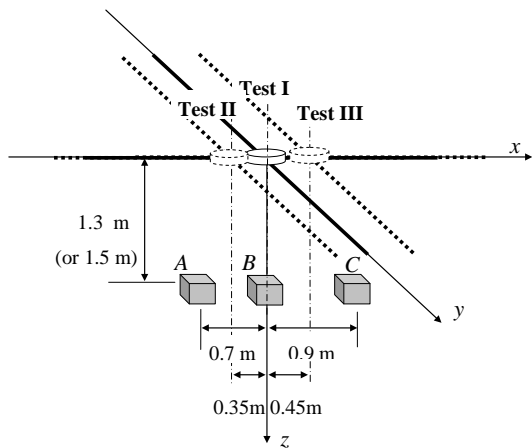


図1 送受波器と埋設物の位置関係

系の概要を示す。

シミュレーションでは、先ず、電磁誘導型音源の特殊な放射特性を考慮した基準波形を作成し、各受波器でのシミュレーション受信信号は音波伝搬時間と拡散減衰及び音源の指向特性を考慮してそれぞれ作成した。映像化対象として、図1に示す探査実験に合わせた埋設物のモデルに加えて、音源真下に1個、それとの水平距離が連続的に変化させた1個計2個の埋設物についても検討した。

(2) 適切な受波器アレーの配置方法について

三次元映像化探査において、クロス型受波器アレーを用いた場合、設置した受波器の対称性による虚像の出現を軽減させるために、円形型受波器アレーを提案し、シミュレーションおよび探査実験により、その虚像抑制効果について検討を行った。図2に、2種類の送受波器アレーの配置を示す。

シミュレーションでは、まずクロス型受波器アレーと同等な分解能の得られる円形型受波器アレーの開口幅を検討した。次に、同等な分解能に相当するそれぞれの開口幅の2種類の受波器アレーを用いて、12個の受信出力の加算結果を有効映像化レベルと定義し、埋設物以外の場所での虚像の出現可能性を比較評価した。

探査実験は、3 m × 3 m × 3 m のモデル砂槽を用いて行った。地表面下 1.5 m の深さに、表面積 40 cm × 40 cm (A) と 30 cm × 30 cm (B) の2種類の大きさのコンクリートブロック計3個を埋設物として設置した。受波器アレー軸に対し、(70 cm, 70 cm, 150 cm)にAを、(70 cm, -20 cm, 150 cm)と(-30.4 cm, 25 cm, 150 cm)にB₁とB₂をそれぞれ埋設された。

(3) 地表音速と地中音速の関係について

弾性波を用いた地中埋設物の探査方法では、探査点に該当する各受信出力の抽出には、地中音速が重要なパラメータとなっている。

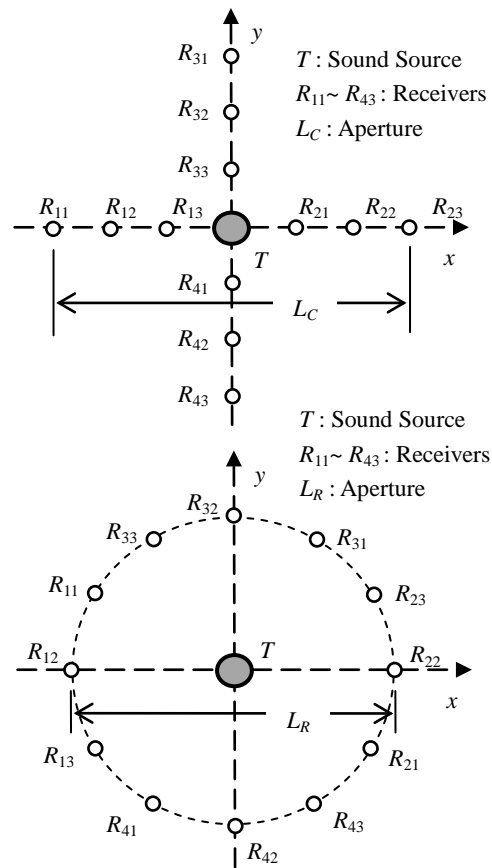


図2 クロス型と円形型送受波器アレー

モデル砂槽を用いた探査実験では、予めモデル砂槽中に埋設された受波器より実測した地中音速を用いた。しかし土砂中の音波伝搬が非常に複雑で、地域によって音速のバラつきも大きいため、現場実測において、地面を掘り下げて受波器を埋め込むことで測定場所での地中音速を得ることが応用効率の低下につながると考えられる。ここで、実用の便性を図り、地面を掘り下げなく、地表面で測定した音速より地中音速を推測する可能性に着目し、モデル砂槽を用いて地表音速と地中音速の関係について実験的に検討した。

実験では、電磁誘導型音源と地中 1m 深さと 2m 深さに予め埋設されている2つの受波器より地中音速、音源と地表面の受波器より地表音速、参考のために横波発生アダプタ付き音源と地中の受波器より地中横波音速をそれぞれ測定した。複数回のパルス受信信号よりピーク値の時間対音源・受波器間隔の分散データの回帰直線の傾きよりそれぞれの音速を求めた。

4. 研究成果

(1) 横方向の有効探査範囲について

図3に、一例として深度 1.3m の埋設物に Test I の位置関係で得られた映像化結果を

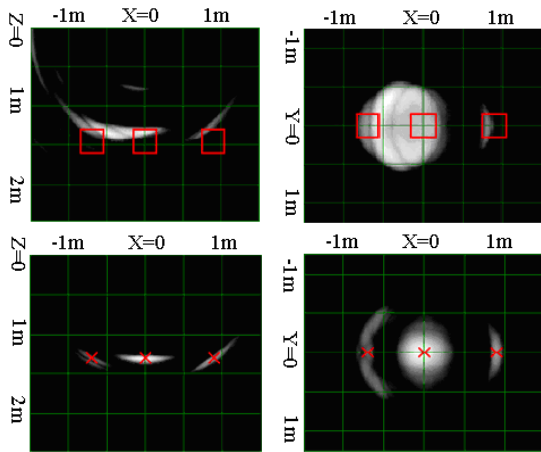


図3 映像結果例

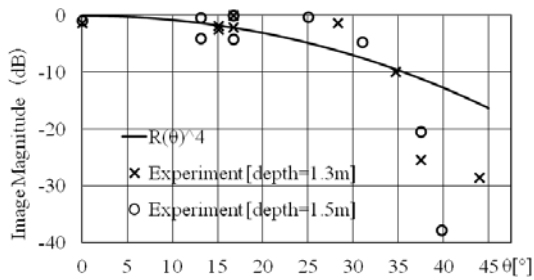


図4 複数埋設物の映像値分布

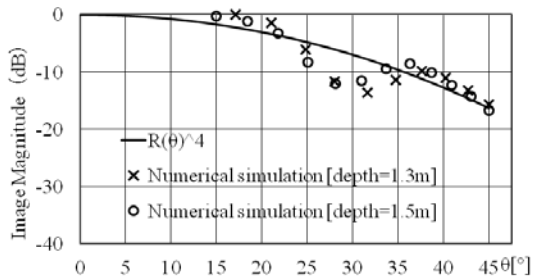


図5 横位置連続変化の埋設物の映像値分布

示す。上段は実験結果、下段はシミュレーション結果で、左は垂直断面、右は水平断面である。

同様に、3種類の位置関係、2種類の埋設物深度計6つの条件で得られた三次元映像結果より、埋設物ごとの映像値と音源からの指向角度の関係をまとめ、図4に示す。比較として、2つの埋設物の間隔を連続に変化させたシミュレーション結果を図5に示す。ここで、図中の曲線は音源の指向特性より見積もった理論値である。

これらの結果より、複数埋設物を探査する場合、音源の中心軸より35°以上の横位置では、映像値が急激に低下し、本探査方式の横方向探査能力は音源の中心軸から指向角35°程度以内であることを明らかにした。

(2) 適切な受波器アレーの配置方法について

図6に、虚像出現可能性を表す有効映像化レベルのシミュレーション結果を示す。上はクロス型受波器アレーを用いた場合で、下は円形型受波器アレーを用いた場合である。両方とも埋設物の位置で高い出力が得られているが、クロス型受波器アレーを用いた場合での埋設物と同一円周上に現れた高い出力が、円形型受波器アレーを用いることで抑制されていることが判る。

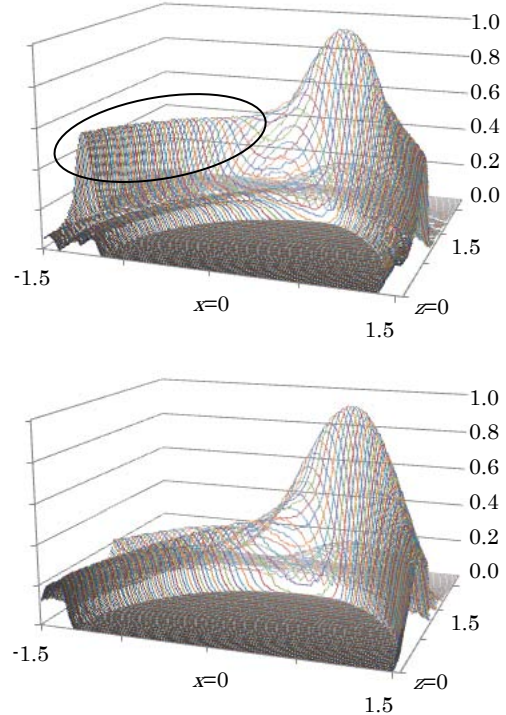


図6 有効映像化レベルの比較結果

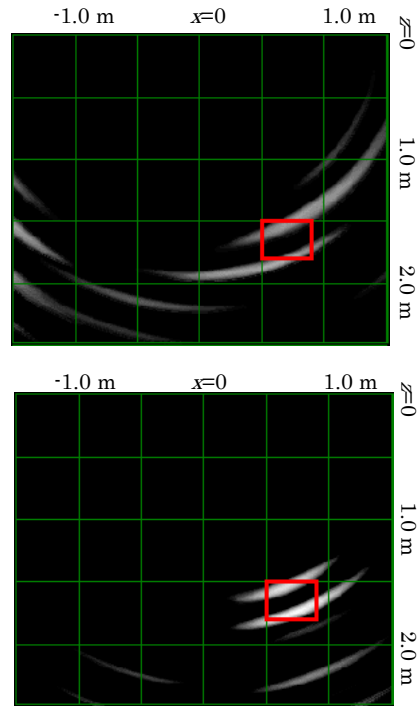


図7 映像化探査実験の比較結果

図7に、映像化探査実験より得られた垂直断面の映像比較結果を示す。上はクロス型受波器アレーを用いた場合で、下は円形型受波器アレーを用いた場合である。両方とも埋設物の位置に映像化されているが、クロス型受波器アレーを用いた場合での埋設物以外の位置で現れた虚像が、円形型受波器アレーを用いることで軽減されたことが確認できた。

(3) 地表音速と地中音速の関係について

図8と図9に、地中1m(上図)と2m(下図)深度に埋設された受波器より得られた地中縦波速度と横波速度の測定結果をそれぞれ示す。図10に、地表面音速の測定結果を示す。結果より、地中異なる深度での受波器

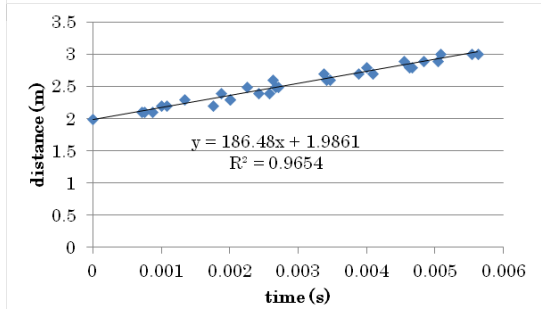
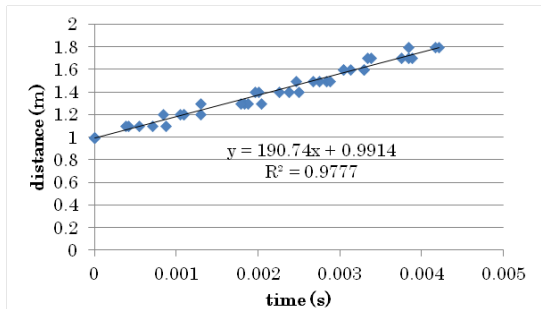


図8 地中縦波速度の測定結果

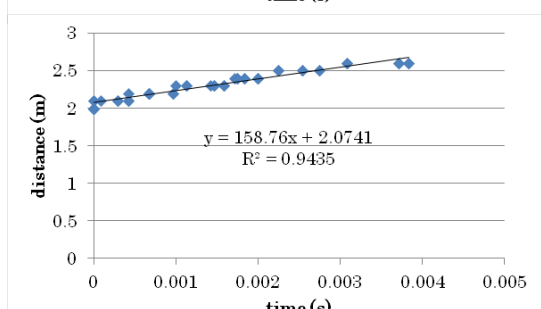
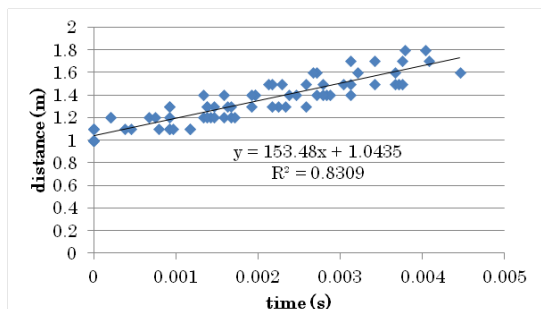


図9 地中横波速度の測定結果

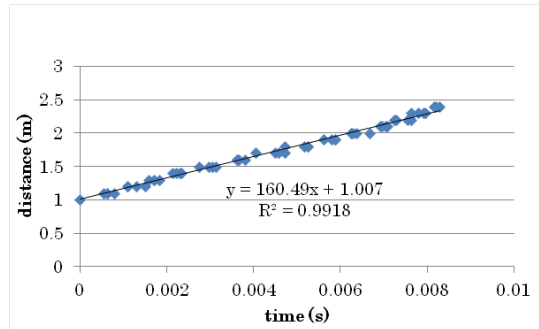


図10 地表音速の測定結果

の測定結果がほぼ同様で、縦波速度は約189m/s、横波速度は約156m/s、地表面音速は約160m/sであることが得られ、地表音速は地中縦波速度の85%程度であることが判った。

地中音速に関する研究の報告が乏しく、土砂中の音波伝搬も複雑であるため、今後は異なる場所での測定データの積み重ねや地中音速と地表音速の関係の理論説明について更なる研究が必要である。

なお、この部分の初期成果については、日本音響学会 2012 年秋季研究発表会にて研究発表を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 陶良、本岡誠一、地中埋設物の三次元映像化探査における受波器アレーの配置方法、電子情報通信学会論文誌、査読有、Vol. J94-A, No. 11, 2011, pp. 870-877.
- ② RYO TOH, SEIICHI MOTOOKA, Lateral Detecting Limit of Underground Imaging Owing to Directivity of Sound Source, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有、Vol. 49, No. 7, 2010, 07HC16.

[学会発表] (計3件)

- ① 安藤大樹、陶良、渡辺勉、本岡誠一、弾性波を用いた地中埋設物の三次元映像化—受信器アレーの設置方法について、日本音響学会 2010 年秋季研究発表会、2010 年 9 月 16 日、関西大学
- ② 安藤大樹、陶良、渡辺勉、本岡誠一、弾性波を用いた地中埋設物の三次元映像化—大きさの異なる複数埋設物の探査、日本音響学会 2010 年春季研究発表会、2010 年 3 月 8 日、電気通信大学
- ③ RYO TOH, SEIICHI MOTOOKA, Lateral detecting limit of underground imaging owing to directivity of sound source, Symposium on Ultrasonic Electronics, 2009 年 11 月 18 日、同志社大学

[その他の発表] (計1件)

- ① [招待講演]陶良、地中埋設物の映像化探査

査、弾性波診断技術協会第1回シンポジウム、2011年2月23日、国士舘大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陶 良 (TOH RYO)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号：60327161

(2) 研究分担者

本岡 誠一 (MOTOOKA SEIICHI)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号：60083862

(3) 連携研究者

渡邊 勉 (WATANABE TSUTOMU)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号：90083881