

# SLDV を用いた極浅層地中探査法の研究

## —空中放射音波を用いた探査法の検討—

阿部 冬真<sup>1)</sup>・杉本 恒美<sup>2)</sup>

桐蔭横浜大学工学部

(2009 年 3 月 7 日 受理)

### 1. はじめに

現在、地中埋設物の探査には主に電磁波を用いたレーダ探査や磁気探査などの手法が使われている。これらの手法は乾燥した土壌では有効であるが、電解質を含む土壌や含水率の高い泥土壌では探査が困難となる。また地表面から 10 cm までの極浅層領域の探査は地表面からの反射波の影響で難しい。しかしながら昨今カンボジアなど世界中で残存地雷が問題となっている。探査には金属探知機を用いた手法が主に用いられているが、プラスチックで構成された地雷の探査は容易ではない。また地雷以外の金属片に反応してしまう問題もある。そこで本研究室では音波を用いた地雷などの極浅層地中埋設物探査が可能かどうか検討を行っている<sup>(1)</sup>。

本研究は Scanning Laser Doppler Vibrometer (以下 SLDV と略す) を用いて二次元的に地表面の振動伝搬を捉えることで、地雷などの極浅層地中に存在する埋設物の探査、映像化を行うことを目的としている<sup>(2,3)</sup>。探査領域は地表面から 10 cm までを想定している。これまで、超磁歪振動子を用いて直接地面を振動させる方法にて探査を行っていた<sup>(3)</sup>。

しかし実際の地雷探査を想定した場合、なるべく地面と接触せずに探査を行うことが望ましい。そこで振源に平面スピーカを用いることにした。平面スピーカを用いることで地表面に非接触での探査が可能となる。今回は平面スピーカと超磁歪振動子をそれぞれ振源に用いた場合の比較検討、屋外での埋設物探査実験を行った。

### 2. SLDV を用いた探査概要

#### 2.1. 探査法の概要

SLDV (Polytec CorP. PSV400-H8) を用いた探査概要図を Fig.1 に示す。伝搬媒質である土に対して明らかに音響インピーダンスの異なる埋設物が土中に存在すると、伝搬する振動が埋設物の影響を受ける。そして埋設物が地表面付近に存在した場合、振動の変化は地表面上にも現れることが確認されている<sup>(2)</sup>。その振動変化を、SLDV にて二次元的に地表面の振動伝搬を測定することで取得する。SLDV は非接触での振動伝搬取得を行えるので、ジオフォンのように地面に設置させる必要がないという利点がある。また SLDV は周波数成分にて映像を作成するので、特定の周波数にて埋設物上と周囲の応答に差があ

Touma Abe<sup>1)</sup>: Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

Tsuneyoshi Sugimoto<sup>2)</sup>: Department of Electronics and Information Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama, 225-8502

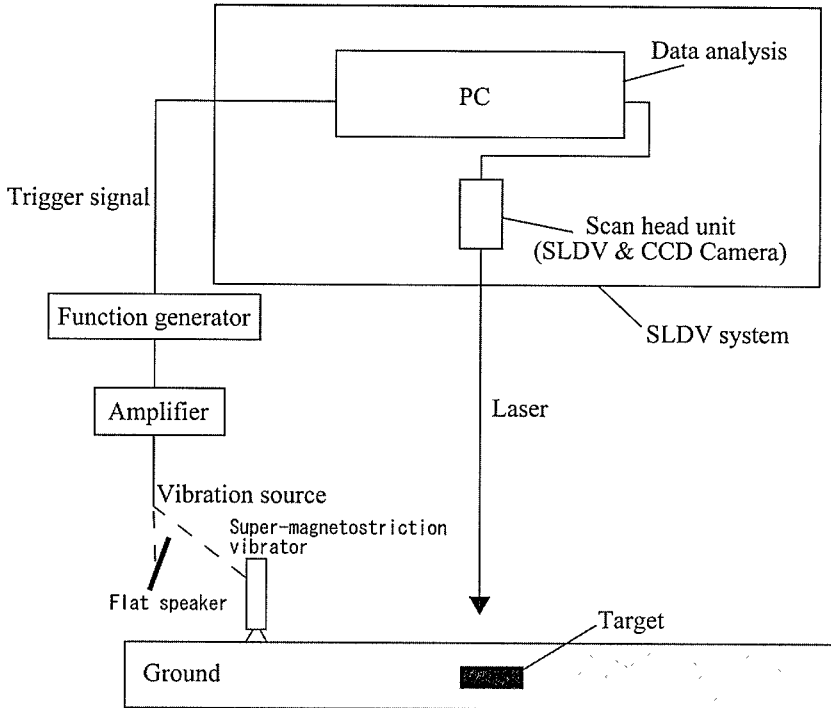


Fig.1 Fundamental concept of exploration method using SLDV.

れば映像化が可能である。

## 2.2. 振源

平面スピーカ (FPS Corp., 2030M3P1R) は縦 30cm、横 20cm のスピーカである。音波の指向性が鋭く、平面波として伝搬するため効率的にスキャンエリアを振動させることができると考えられる。平面スピーカを用いた場合、地面に対して非接触の振源となる。この際、地中の極浅層領域において多孔質弾性体理論として存在が理論的に予想されていた、第二種縦波が浅層地中に発生することが確認されている<sup>(4,5)</sup>。この第二種縦波は地表面から深さ 15 cm 程度までの領域において伝搬する<sup>(6)</sup>。また第二種縦波は地面に対して垂直状態から約 20° 程度傾けた、比較的浅い角度で発生しやすいことが判明している<sup>(7)</sup>。そのため本研究では平面スピーカを地面に対して約 20° 傾けた状態で実験を行っている。

超磁歪振動子 (Moritex Corp., AA140J013-MS1) は半径 1.5cm、高さ 20cm の円柱形の振動子である。地面と接触する振動子なので、地中にて弾性波が発生する。弾性波は縦波、横波、表面波からなるが、極浅層地中においては表面波の影響がもっとも強い。本研究では伝搬した波が埋設物によって影響を受け、その影響が地表面上に現れれば探査が可能となるので厳密にどの波を取得しているのかを考える必要はない。そのため超磁歪振動子を振源に用いた場合、SLDV が取得するのは弾性波の縦方向振動である。以後、平面スピーカを用いた場合を空中放射音波、超磁歪振動子を用いた場合を弾性波振動と呼ぶ。

## 2.3. 実験環境

研究室内の実験は理想的な条件になるように、比較的粒径の揃った砂 (300 μm 前後) を用いた砂槽 (110cm × 90cm × 45cm) に行った。一方屋外実験は茨城県の休耕地に

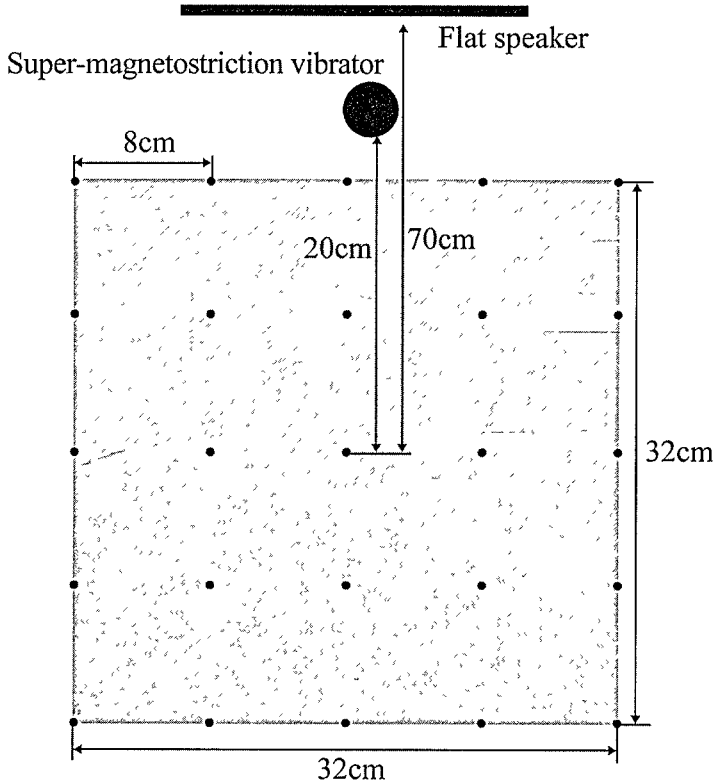


Fig 2 Setup for the vibration velocity comparison experiment.

て行った。休耕地なので土地の養分が豊富で雑草などがすぐ育つほか、地中には根が張っている。またそばを高速道路が通っているなど実験を行うには少々過酷な条件の場所である。屋外実験は雑草を刈り、地表面を露出させてから行った。また埋設物は実験開始の一年以上前に 2cm の深さに埋設しており、周囲の土と定着させている。埋設物にはプラスチック地雷を想定し、砂糖を詰めたプラスチック容器（半径 5cm、高さ 9cm）を使用した。砂糖を詰めた理由は地雷に使用されている TNT 火薬に比較的比重が近いためである。なお TNT 火薬の比重は  $1.65\text{g/cm}^3$ 、砂糖の比重は  $1.59\text{g/cm}^3$  である。

### 3. 超磁歪振動子と平面スピーカの振動速度比較実験

#### 3.1. セットアップ

研究室内にて超磁歪振動子と平面スピーカを振源に用いた際の、砂表面の振動状況を比較する実験を行った。実験セットアップ図を Fig 2 に示す。スキャンエリアは  $32\text{cm} \times 32\text{cm}$  の正方形、スキャンポイント間隔 8cm で、総スキャンポイント数 25 ポイントである。平面スピーカからエリア中央までは 70cm、超磁歪振動子からは 20cm にした。送振波形は sin 波形バースト 10 波、周波数 300Hz を用いた。

#### 3.2. 振動速度測定結果

全スキャンポイントの周波数に応じた振動速度を平均したグラフを Fig.3 に示す。Fig 3 を見ると空中放射音波は弾性波振動と比較して振動速度が低く、帯域が広がっていることが分かる。また弾性波振動が送振周波数以外の様々な周波数成分を含むのに対し、空中放

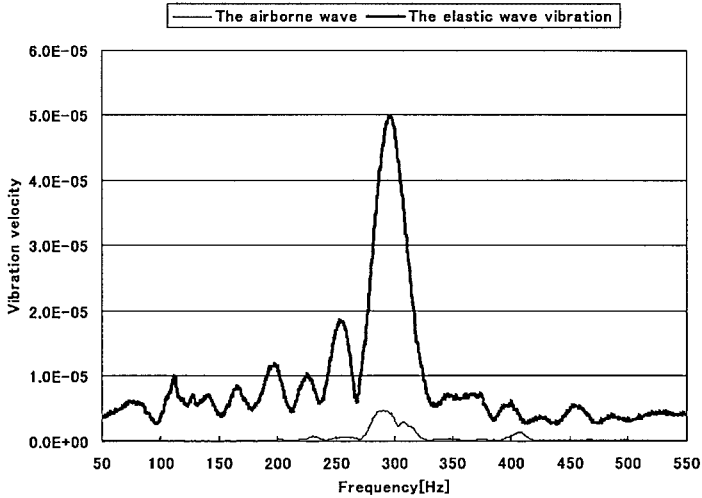


Fig.3 The graph of the vibration velocity on the sand surface vs. frequency.

Nothing was buried. Two vibration sources were compared. This graph shows the average of the vibration velocity at all of the scanning points. A thin line shows the airborne wave, and a bold line shows the elastic wave vibration.

超音波は送振周波数近辺の周波数成分しか含まないことが見て取れる。弾性波振動は振源である超磁歪振動子が砂表面と触れているため、送振による超磁歪振動子自体の振動が影響を及ぼす。そのため様々な周波数を含むと考えられる。一方、空中放射音波は音波だけが砂表面に達するため、送振周波数とその近辺の周波数成分のみ含む結果になったと思われる。この結果から送振周波数と埋設物応答の周波数がずれていた場合、映像化が行えない可能性がある。そこで実際の探査を想定すると、空中放射音波を用いる場合は noise 波など様々な周波数成分を含む送振波を用いる必要があると考えられる。手順としては noise 波で探査を行い、取得映像から埋設物応答と思われる応答が確認できた周波数のバースト波を送振して確かめる方法がよいのではないかと考えられる。

## 4. 屋外埋設物探査実験

### 4.1. セットアップ

屋外にて空中放射音波を用いて埋設物探

査が行えるのかを確認した。セットアップ図を Fig.4 に示す。スキャンエリアは 50cm × 60cm の長方形、ポイント間隔 5cm、総ポイント数 143 ポイントに設定した。平面スピーカは二つ使い、対面するように設置した。これは地表面の横方向振動をキャンセルし、縦方向振動を強調する狙いがある。送振波には一秒間隔の noise 波と 150Hz の sin 波形バースト 50 波を用いた。

### 4.2. 埋設物の応答周波数確認

埋設物の応答がどの周波数にて確認できるのかを調べるため、埋設物上の 2 ポイントと周辺の 4 ポイントをそれぞれ平均し、比較した。Fig.5 (a) に noise 波の、Fig.5 (b) に 150Hz バースト波を用いた際のグラフを示す。Fig.5 (a) を見ると 150Hz 近辺に埋設物上で、周辺とは違う応答を示していることが分かる。そのため 150Hz 近辺に埋設物の応答周波数があると考えられる。また Fig.5 (b) では埋設物の応答周波数に近い周波数で送振を行ったためか、埋設物上と周辺の応答に明らかな違いが現れた。また noise 波では差があった 200Hz から

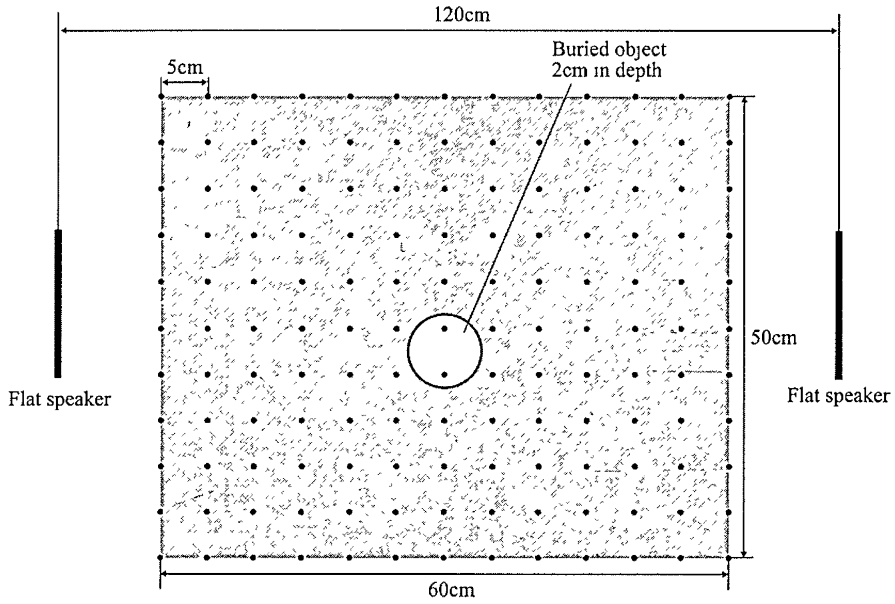


Fig 4 Setup for the outdoor experiment.

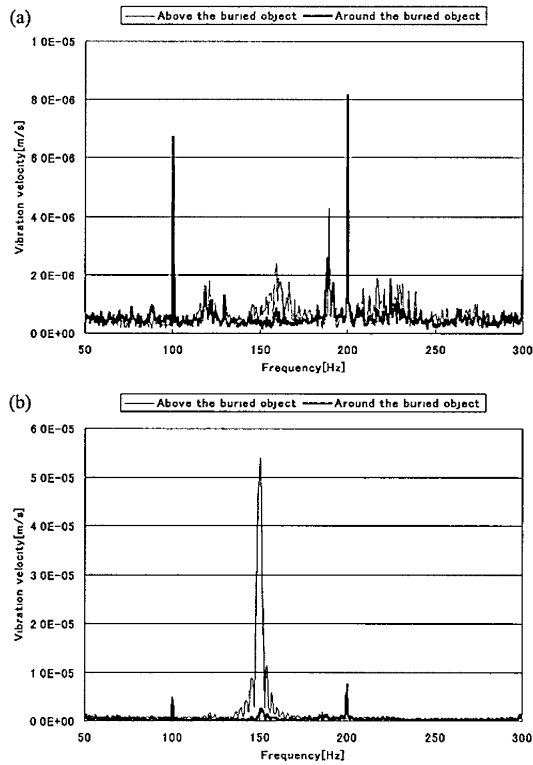


Fig 5 The graph of the vibration velocity on the ground surface vs frequency. Buried position is 2cm in depth. The graph shows the frequency response of the buried object. A thin line shows the vibration velocity above the buried object, and a bold line shows the vibration velocity around the buried object.

- (a) Using noise wave
- (b) Using burst wave

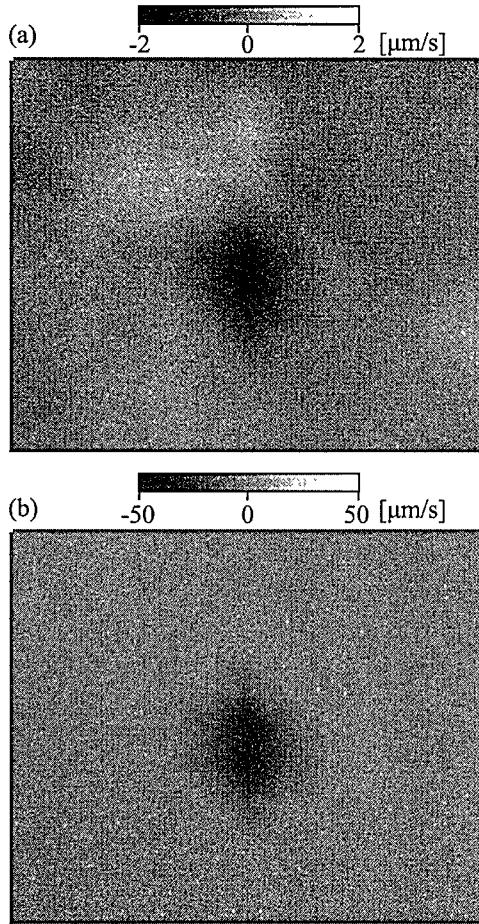


Fig.6 Images of the ground surface vibration.  
 (a) Using noise wave (159Hz)  
 (b) Using burst wave (150Hz)

250Hz にかけての応答は見られない。そのため 200Hz から 250Hz にかけての応答は埋設物応答ではないと考えられる。

#### 4.3. 映像化

Fig.6 (a) に noise 波を用いた際の映像を、Fig.6 (b) に 150Hz のバースト波を用いた際の映像を示す。noise 波の映像は 159Hz の、150Hz バースト波の映像は 150Hz の映像である。双方の送振波で埋設物を確認することが出来た。

## 5. まとめと今後

SLDV を用いて極浅層地中の映像化を行った。空中放射音波と弾性波振動を比較し、空中放射音波が送振周波数近辺の周波数成分しか含まないことを確認した。また屋外にて埋設物探査を行い、空中放射音波にて探査が可能なことを確認した。noise 波を用いてもバースト波を用いた場合と同じ周波数域に埋設物応答を確認でき、noise 波での探査も可能な

ことが分かった。砂糖を詰め、地雷を模した埋設物の応答周波数が 150Hz 付近にあることが分かった。

今後は想定探査深度である 10cm までの深さの埋設物探査が行えるのか検討する。また埋設物の形状や材質などを変え、様々な埋設物に対して探査が可能なのか調べていく予定である。

## 6. 参考文献

- (1) 渡邊, 井山 音講論 (春) pp.1215-1216 (2007)
- (2) J.M.Sabatier, et al, IEEE Trans. Geosci. & Rem. Sens. 39, pp1146-1154, (2001)
- (3) 阿部, 杉本 音講論 (春) pp.1413-1416 (2008)
- (4) M.A.Biot, JASA, Vol.28, No.2, pp.179-191, (1956)
- (5) J.S.Martin, et at, Proc. of SPIE Vol.4742, pp606-616, (2002)
- (6) 守屋, 奥島, 杉本 JJAP, Vol.42, pp.1331-1336, Part 1, No.5B, (2003)
- (7) 鶴見, 木村 音講論 (秋) pp.1145-1146 (2003)