

SLDV を用いた極浅層地中探査法の研究

— 埋設物の識別に関する検討 —

阿部 冬真¹・杉本 恒美²

桐蔭横浜大学工学部

(2010 年 2 月 26 日 受理)

1. はじめに

現在、音波振動を用いた地中探査は油田や地層探査などを目的とした、大深度地下領域に対して弾性波探査が広く行われている。弾性波探査は地中内で発生する縦波を用いた探査法である。弾性波探査は地中数十 m 以降の深層領域に対して有効であるが、伝搬距離が十分でない浅層領域においては他の波と分離が難しく、探査が行えない。そこで地中数十 cm から数 m の浅層領域に対して横波を用いた探査法が研究、提案されている¹⁾。横波は位相を反転させると受振される波形の位相も反転するという特徴がある²⁾。この特徴は横波特有のものであり、縦波や表面波では位相の反転は起こらない。この現象から位相を反転させて受振した波形と、反転させずに受振した波形の二つの差を取ることによって他の波の影響を打ち消し、横波だけを抽出することが可能である。上記した二つの手法で、地中数十 cm 以降の探査は可能となっている。しかしながら、地表面から 10 cm 程度までの極浅層領域の探査はこれまで行われていなかった。地表面付近では表面波の影響が非常に大きく、また探査対象との距離が近いために反射波の分離が行えないためである。地中は媒質が均一ではなく、ま

た空気を含むために音波の減衰が激しい。そのため医用で用いられている超音波診断装置や超音波探傷のように、送振に用いる周波数を超音波の周波数帯まで上げて振動の受振は不可能である。さらに、上記した二つの地中探査手法は振動の受振に Geophone と呼ばれる地面に挿しこむ速度センサを用いており、極浅層領域においてはその行為自体が影響を及ぼすという問題も存在する。

一方、今日における世界的な問題の一つに、残存地雷の問題が挙げられる。地雷探査には主に金属探知機が用いられているが、近年の地雷は主にプラスチックで構成されているため探査が非常に難しい。またターゲットである地雷以外の金属片に反応してしまう問題もある。電磁波を用いた地中レーダ探査も行われているが、地中レーダは土壌の誘電率、密度、含水率といった土壌性質に影響を受ける。特に含水率の多い地域やラテライト土壌と呼ばれる電解物質を多く含む土壌での適応が難しい。その他にも機械探査や地雷犬など様々な手法があるが、それぞれの手法にそれぞれ問題が存在する。

このような状況に対し、近年音波振動と Scanning Laser Doppler Vibrometer (SLDV) を用い、レーザによる地表面の振動分布計測を行うことで極浅層地中埋設物の探査が可能

¹ Touma Abe : Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² Tsuneyoshi Sugimoto : Department of Electronics and Information Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, 225-8502

であることが確認され始めた^[3,4]。音波振動を用いることで金属探知機のように対象物の材質に拠ることなく、また地中レーダが苦手とする土壌での探査が行えるという利点がある。またSLDVを用いるため、地表に対して非接触での探査が行え、地雷探査を想定した場合の安全性の確保にも繋がる。本研究は極浅層地中埋設物の探査システムの構築を最終的な目的とし、音波振動とSLDVを用いた探査、映像化について検討している。主なターゲットは地雷であるが、地雷に限らず様々な埋設物の探査が行えるか検討している。なおプラスチック容器をターゲットとした我々の過去の研究で、研究室内および屋外において映像化が可能であることを確認している^[4]。今回は内部状況や材質の異なる埋設物の探査実験を行い、内部状況や材質が変化すると埋設物の応答周波数帯がどのように変化するのか確認した。そして各埋設物の応答周波数帯から、埋設物の識別が可能か検討した。

の垂直方向の振動を取得できるように、上方に設置している。振源より生じた音波によって励起された地中の振動を、SLDVを用いて地表面上を二次元的にスキャンすることで取得する。埋設物と伝搬媒質である土では音響インピーダンスが大きく異なる。そのため埋設物が地表面付近に存在した場合、地中の振動伝搬に影響を及ぼし、その影響が地表面上でも観測できる可能性がある。そのような影響によって埋設位置上と周辺部の振動伝搬に差が生じれば、埋設物の探査は可能であり、また実際に確認されている^[3,4]。今回、振源には平面スピーカ（FPS Corp. 2030M3P1R）を二つ用いた。スピーカを用いて空中から地表に向けて音波を発生させた際、極浅層領域において第二種縦波が発生することが確認されている^[3]。この第二種縦波はBiot - Stollモデルにて存在が理論的に予想されていた波である^[5]。第二種縦波はスピーカの角度を地表面に対して約20°程度傾けた、比較的浅い角度に傾けた場合に発生しやすいことが確認されている^[6]。そこで本研究では平面スピーカの角度を20°にして実験を行なっている。

2. SLDV を用いた探査概要

2.1. 探査概要

Fig.1 に SLDV (Polytec Corp. PSV400-H8) を用いた探査概要図を示す。SLDV は地表面

2.2. 実験概要

実験は全て、粒径 300 μ m 前後の砂を用

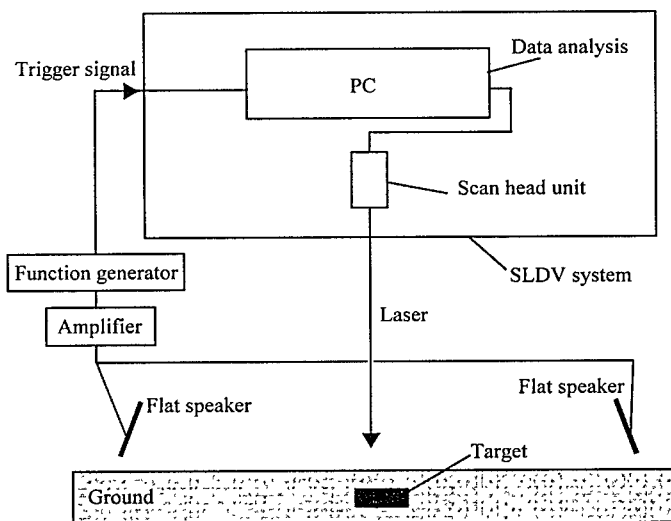


Fig.1 Fundamental concept of exploration method using SLDV

いた研究室内の砂槽 (135 cm × 110 cm × 50 cm) に行った。実際の土壌とは条件が異なるものの、同一条件を作りやすく、また理想的な状態での実験が行える。使用した埋設物はプラスチック容器 (11 cm × 11 cm × 6 cm)、中空スチール缶 (dia. 8.5 cm × 8 cm, 70 g)、素焼き鉢 (top dia. 12 cm × bottom dia. 4 cm × 4 cm, 225 g, hole dia. 1.5 cm)、石 (5.5 cm × 6.5 cm × 2.7 cm, 210 g) である。なおプラスチック容器の内部状況は中空 (80 g)、砂を詰めた状態 (825 g)、砂糖を詰めた状態 (540 g) の三種を用意し、合計 6 種の埋設物をターゲットとした。実験に用いた埋設物を Fig.2 に示す。砂を詰めたプラスチック容器は、周辺の状態に近い状態でどのようにデータが取得できるか確認するために用いた。また地雷に使用されている TNT 火薬と砂糖の比重が比較的近いため、砂糖を詰めたプラスチック容器は模擬プラスチック地雷としている。なお砂糖の比重は 1.59 g/cm³、TNT 火薬の比重は 1.65 g/cm³ である。砂と砂糖は容器内に隙間なく詰められており、重量が異なるのは両者の比重による。素焼き鉢は遺跡探査などで出土する皿などを想定している。

スキャンエリアは 28.8 cm × 33.6 cm で、



Fig.2 Buried objects. (a) Plastic container (11 cm × 11 cm × 6 cm). (b) Hollow steel can (dia. 8.5 cm × 8 cm). (c) Unglazed pot (bottom view, top dia. 12 cm × 4 cm × bottom dia. 4 cm, hole dia. 1.5 cm). (d) Stone (5.5 cm × 6.5 cm × 2.7 cm)

各ポイント間隔は 2.4 cm とした。総ポイント数は 195 ポイントである。実験セットアップ図を Fig.3 に示す。埋設物は全て深さ 2 cm に埋設した。なお埋設後約 30 分間砂袋を用いてスキャンエリアを加圧し、埋設時に砂中に含まれる空気を除いてから実験を行っている。送振には 1 秒間出力の noise 波 (white noise) を用いた。noise 波を用いた理由は、様々

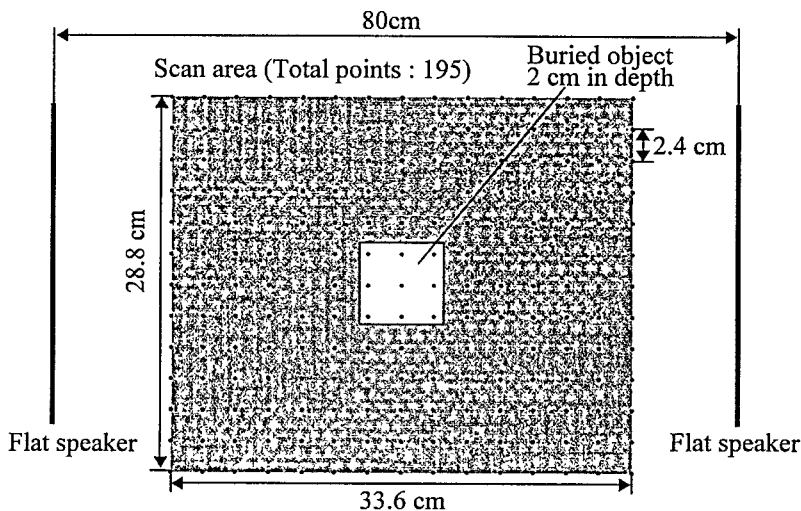


Fig.3 Experimental setup

な周波数成分を含むためである。

3. 応答周波数帯の確認手法

埋設物上でのみ現れる周波数応答を輝度映像化することで、応答周波数帯の確認を行う。埋設物上でのみ現れる応答を抽出するため、まず埋設位置と周辺部の周波数に応じた振動速度の振幅値をそれぞれ平均し、その差を(1)式にて最大値を1として周波数毎に規格化する。ここで $S(\omega)$ は振動速度差の規格化結果(Standardization result of the vibration velocity difference)、 $B(\omega)$ は埋設位置(Buried position)の、 $P(\omega)$ は周辺部(Peripheral position)の、それぞれ周波数に応じた振動速度である。

$$S(\omega) = 1 - \frac{P(\omega)}{B(\omega)} \quad (1)$$

埋設位置の確認にはSLDVのソフトウェア(Polytec Scanning Vibrometer software)から得られる映像化結果を用いる。Fig.4に中空プラスチック容器埋設時の映像化結果例を

Buried object : Hollow plastic container
Imaging frequency : 144 [Hz]

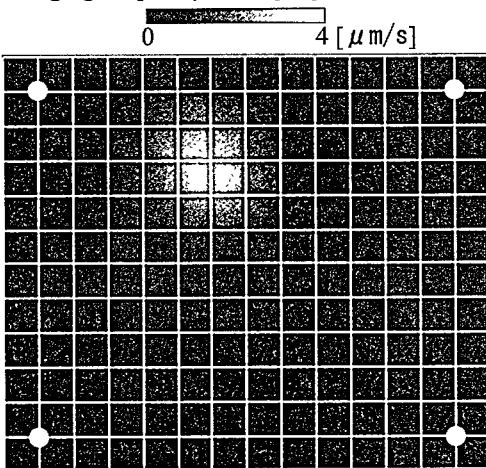


Fig.4 Example of the ground surface imaging result by SLDV software. The buried object is the hollow plastic container. Imaging frequency is 144 Hz. The white circles are used as mean value of the peripheral position of the scanned area.

示す。Fig.4において白丸で囲った4ポイントの振動速度を平均することで周辺部の振動速度としている。Fig.5(a)に埋設位置と周辺部の振動速度比較、(b)に規格化結果例を示す。 $S(\omega)$ の値が最大値である1の半値以上を示した値のみを抽出して輝度映像を作成する。抽出の目的は余計なノイズ応答の除去である。また半値とした理由は周辺部との差が半値程度ないと、SLDVのソフトウェアなどで映像化を行った際に十分な結果が得られないためである。Fig.6に輝度映像化結果例を示す。輝度映像化を行う理由は応答の範囲や強弱が確認しやすくなること、および周波数毎に振動速度差を規格化することで最大振幅値に影響されることなく応答を確認することが出来るためである。

4. 応答周波数帯の輝度映像化結果

Fig.7に各埋設物の応答周波数帯を輝度映像化した結果を示す。中空プラスチック容器の結果では100 Hzから200 Hzにかけて応答していることが見て取れる。特に150 Hz以下で強く応答している。それに対し砂を詰めたプラスチック容器の結果では150 Hzから200 Hz過ぎまで応答している。中空プラスチック容器埋設時に強く応答していた150 Hz以下の応答はかなり弱い応答となっている。また砂糖を詰めたプラスチック容器の応答周波数帯は、200 Hz前後にかなり狭い範囲に存在する。中空や砂を詰めた状態のプラスチック容器で応答を示した周波数帯の応答はほとんど確認できなくなっていることが見て取れる。このように、容器は同じでも内部状況が変化すると埋設物の応答周波数帯が変化することが確認できた。中空スチール缶の結果では150 Hzから200 Hzにかけて応答が見られた。材質は異なるものの、中空であることからプラスチック容器の応答周波数帯に近い結果になったと思われる。一方素焼き鉢はプラスチック容器や中空スチール缶の応答周波数帯と比較して、1000 Hzから1200 Hz近

辺にかけてと、高い周波数帯で応答が確認できる。また応答が二つに分かれている点も特徴的である。石の応答周波数帯も素焼き鉢とほぼ同等の位置に見られる。これらの結果から、プラスチック容器やスチール缶など、内部に空洞を持つ構造の物体の応答周波数帯は低くなると考えられる。一方素焼き鉢や石など、内部が一様に詰まった物体の応答周波数帯は前者と比較して高くなると思われる。そのため応答周波数帯は密度によって大きく変化するのではないかと考えられる。なお各埋

設物の結果で 1400 Hz 以上に応答が見られるが、SLDV のソフトウェアを用いた映像からは埋設物応答を確認できないため、ノイズ応答であると思われる。

5. まとめと今後の課題

埋設物の応答周波数帯を輝度映像化し、各埋設物の応答周波数帯を比較することで埋設物の識別が可能か検討した。輝度映像化を行うことで人間が視認しやすく、また詳細に応

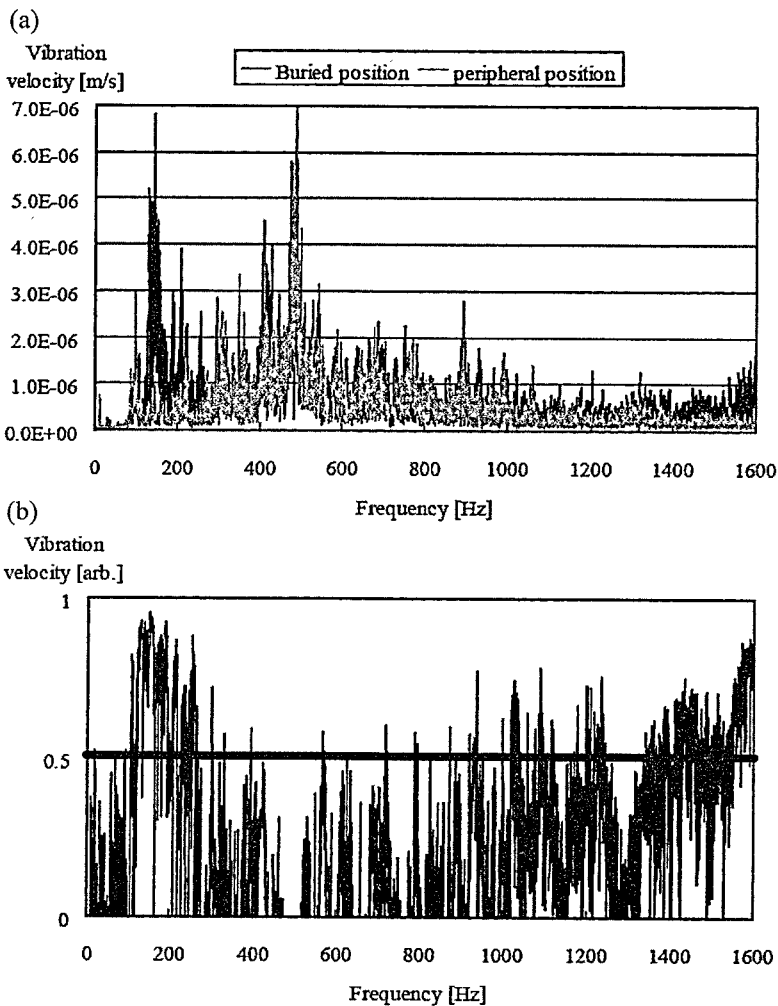


Fig.5 Example of vibration velocity corresponding to frequency. (a) Comparison between the buried position and the peripheral position by Fig.4. (b) Standardization result of Fig.5(a). The high responses of the frequency are used as a brightness imaging when Fig.5(b) is more than the half value (0.5).

答周波数帯を確認することが可能である。プラスチック容器の内部状況を変化させると、応答周波数帯に変化が見られた。また中空スチール缶の結果から、材質が異なっても内部に空洞を持つ物体は比較的近い周波数帯で応答を示すことが分かった。一方素焼き鉢や石などの応答周波数帯は1000 Hzから1200 Hzにかけて見られ、プラスチック容器やスチール缶などと比較して高い周波数帯で応答を示すことを確認した。これは内部まで一様に詰まっているためであると考えられる。そのため埋設物の応答周波数帯は共振周波数および密度による影響が大きいのではないと言える。これらの結果から、事前に応答周波数帯を調べておく必要はあるが、探査ターゲットに合わせた周波数の送振を行うことでターゲットの選択的探査が行えると言える。またこちら事前にも調べる必要があるものの、探査結果からターゲットかどうかを掘り返すことなく識別することも不可能ではないという

ことが言える。

今回は埋設物の深さを全て2 cmとしたが、今後は深さを変化させた場合に応答周波数帯がどのように変化するのか、輝度映像化を用いて検討していきたい。また埋設物の大きさによる応答周波数帯への影響なども確認する必要がある。一方で金属や木材など、様々な材質の応答周波数帯の確認を行う予定である。さらに現在は地中探査を主に行っているが、今後コンクリートなどを対象とした探査が可能か検討していきたい。

参考文献

- [1] H. Kawasaki and T. Sugimoto, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.48 (2009) pp. 07GC08-1 - 07GC08-5
- [2] T. Sugimoto and M. Okujima, Archaeological Prospection, Vol.7 No.4 (2000) pp. 249 - 261
- [3] J. M. Sabatier and N. Xiang: IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens. Vol.39 (2001) pp. 1146 - 1154
- [4] T. Abe and T. Sugimoto, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.48 (2009) pp. 07GC07-1 - 07GC07-3
- [5] M.A.Biot, J.Acoust.Soc.Am, Vol.28, No.2 (1956) pp.179 - 191
- [6] M. Kimura, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.41 (2002) pp. 3513 - 3518

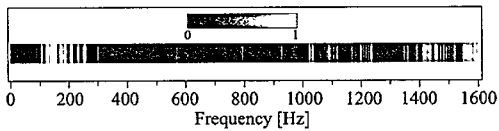


Fig.6 Example of the brightness imaging result of Fig.5(b)

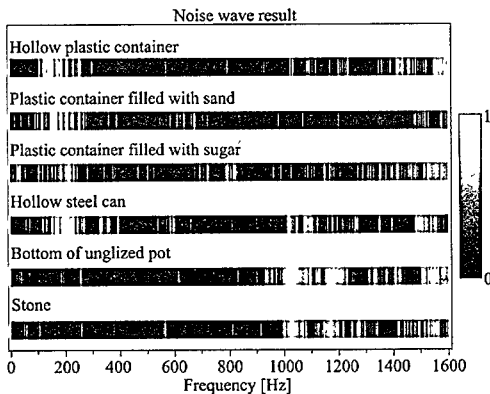


Fig.7 Brightness images of the frequency response range