

論文

空中放射音波とレーザドップラ振動計を用いた 非接触音響探査法に関する研究

——音源搭載型 UAV を用いた浅層地中探査法の検討 II——

Research on noncontact acoustic inspection method using
aerial emission sound wave and laser Doppler vibrometer:
Examination of shallow underground inspection method using sound source
mounted UAV II

上地 樹*・杉本 恒美¹・歌川 紀之²

*¹ 桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

² 佐藤工業(株) 技術センター SOU

(2022 年 9 月 10 日 受理)

I. はじめに

我々は、空中放射音波による音響照射加振およびレーザドップラ振動計 (LDV : Laser Doppler Vibrometer) もしくはスキャニング振動計 (SLDV : Scanning LDV) によるレーザ振動計測を用いた、非接触による非破壊探査法である非接触音響探査 (NCAI: Non-Contact Acoustic Inspection) 法の研究を行っている¹⁻⁹⁾。

本手法を用いて供試体をはじめ、トンネルおよび橋梁等のコンクリート実構造物、タイル張りがなされた建物の壁面、アスファルト舗装等の様々な対象において、直接見ることのできない内部の浮き・剥離の検出を目的として、検証を重ねている。

現在は非接触音響探査法の発展型である遠隔からの内部欠陥の探査が可能、音源搭載型無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Ve-

hicle) とスキャニング振動計を用いた手法を、浅層地中探査に適用可能か検証を実施している。この浅層地中探査技術に関しては過去にも検証が行われており、近距離ではあるが非接触音響探査法により土中内部の埋設物が検出可能であることは確認されている¹⁰⁻¹²⁾。

今回は浅層領域における土中内部の異物 (地雷等) を想定した、非接触音響探査法による長距離計測実験を実施した¹³⁾。実験では、振動計測を行うスキャニング振動計における対象との距離を変化させ、計測距離による結果への影響を検証した。レーザ離隔の影響として、計測距離を長くすることによる計測用レーザ光の距離減衰および計測角度が浅くなることによる受光量の減少を起因とする Signal to Noise (S/N) 比の低下等、いくつかの課題が想定されたが、実験の結果 20 m 程度離れた位置からでも埋設物が検出可能であることを確認している。

今回の非接触浅層地中探査は、前回の実験

* UECHI Itsuki: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² UTAGAWA Noriyuki: Engineering Center, Sato Kogyo Co., Ltd.

と同様に音源が搭載されたドローンを使用する前段階として、ドローンに搭載される物と同型の音源を使用した事前実験である。実験では、地雷を模擬した物の埋設深度を変化させて埋設物試験場の赤土内部に埋設し、埋設深度による計測結果への影響を検証した。実験風景を図1に示す。詳細は後述するが、埋設深度が変化することで土壌表面の振動が増減し、レーザドップラ振動計による計測結果に差異が生じると推測される。



図1 実験風景

II. 非接触音響探査法

浅層領域を対象とした地中探査における非接触音響探査法概念図を図2に示す。非接触音響探査法とは、音響加振とレーザ計測を用いることで対象に接触することなく、対象物内部の剥離や空隙を検出することが可能な方法である。

本手法を用いた基本的な計測の流れとしては、まずスピーカにより放射された音波を用いて能動的に計測対象面を励振させる。そして次に、励振されている場所の振動速度をLDVにより走査を行い、内部の欠陥を検出するというものである。

コンクリート構造物を例に挙げると、計測対象に加振が行われた際、その計測対象面内部に空隙および剥離等の欠陥が存在していた場合その表面部分が板状のような構造になり、

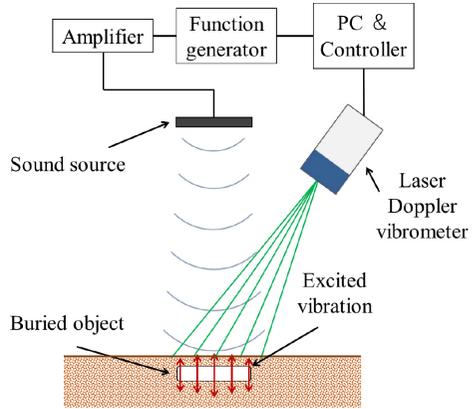


図2 非接触浅層地中探査の概念図

その部分においてたわみ振動が励起される。これにより欠陥が存在する場所では振動が大きくなり、欠陥が存在しない場所と振動に差異が生じるため、欠陥部の位置を特定することが可能になる。ただし、本手法は音波による加振を行っているため、打音法におけるハンマ等による直接加振に比べて、非常に小さなエネルギーしか対象に与えることが出来ない。そのため、ただ音波を当てるだけではコンクリート製の構造物等を励振させることは困難である。そこで重要になるのは、対象の共振現象を利用するという方法である。前述した、欠陥部表面の板状構造における固有振動数と同様の周波数の音波を放射することで共振現象を励起させ、少ない力で対象を振動させることが可能になる。なお、たわみ振動における固有振動数は板状の広さに反比例し、厚さに比例する特徴がある。

上記以外に音響加振を行う際に重要なことがもう一つ存在している。それはスピーカから放射されている音の音圧である。前述した様に非接触音響探査法で使用している音波のエネルギーは微弱である。そのため、ある程度音圧を与えることで加振におけるエネルギーを増加させる必要がある。これは、これまでの研究結果から検査対象面で100 dB (Z特性最大値) 前後必要であることが確認されている。ただし、この音圧の値は対象の欠陥規模や材質にもある程度左右されており、90

dB 程度でも検出可能な物も存在している。

我々が提案している非接触音響探査法は、この様に音波を用いて計測対象面にたわみ共振を励起させ、それにより発生した各測定点における振動分布の差異を LDV により計測し、欠陥部を検出する手法である。

しかし、今回の浅層地中探査では赤土に模擬欠陥が埋設されているため、コンクリートに比べて粒子間の結合力が弱く、板状構造によるたわみ振動が発生するとは考え難い。そのため、音波により励振された埋設物自体の振動が表面に伝搬してきたものを、LDV で検出することになると推測される。このことから今回の目的である埋設深度による影響は、たわみ振動における周波数の変化ではなく、埋設物上の土量の増減による振動振幅自体の変化および土壌表面と埋設物間距離の変化による伝搬時の振動の減衰等が関係してくると考えられる。土壌の粒子間結合力および振動の伝搬について、土壌の含水率による影響も考えられるが、今回は考慮せずに一様であると仮定して計測を行った。

本手法の利点としては前述したとおり、音響加振とレーザドップラ振動計を用いて計測を行うため、長距離からの計測および定量的な検査が可能であること、またトーンバースト波と時間-周波数ゲートを用いることで高い S/N 比が実現可能であることである。

Ⅲ. 実験機器

1. レーザドップラ振動計

埋設物試験場における土表面の振動を計測するための SLDV としては PSV-500 Xtra (Polytec GmbH) を使用した。図 3 にレーザヘッドの写真を示す。この SLDV には高出力の半導体レーザ (1550nm, 出力 10mW) を使用しており、高い受光感度を持ち、長距離での計測を可能としている。また、レーザ光の安全基準はクラス 2 (eye safe) であり、安全面でも問題はない。さらにスキ

ヤニング機能を有しているため、複数点の計測も非常に高速に行うことが可能である。実験ではこの機能を用いて、振動速度分布を計測している。なお実験中は、加振用音波による反射波等を防ぐために防振ケースをつけて計測を行っている。



図 3 PSV-500 Xtra レーザヘッド

2. 加振用音源

音響加振には、前回と同様の平面音源 (FPS Inc., FPS2030M3P1R) を使用した。図 4 に平面音源の写真を示す。音源を搭載する UAV (MATRICE 600 PRO: DJI Co., Ltd.) の最大積載量 (ペイロード) が 6 kg であるため、重量 2.2 kg のこの音源ならば十分に積載可能である。また過去に使用経験もあるため、この音源を搭載することを想定して浅層領域における地中探査を実施している。

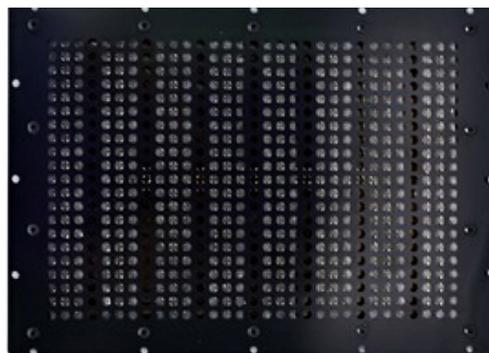


図 4 実験に使用した平面音源の写真

3. 埋設物

模擬欠陥として実験に使用したプラスチックボールベースを図5に示す。直径は約300 mm、高さは約70 mmであり、中心部に直径約60 mmの穴が開いたドーナツ型になっている。実際の用途としては、ボールの転用抑制を行うものであり、内部に水または砂など入れて重量を増加させるため中は空洞であり、取り外し可能なキャップが付いている。実験時は中身が空洞の状態での埋設された。



図5 プラスチックボールベース：直径300 mm

4. 埋設位置

非接触音響探査法を用いた浅層領域における地中探査の実験対象とした埋設物試験場を図6に示す。試験場内側の大きさは2000 × 2000 × 500 mm³であり、赤土が充填されている。赤土内部には模擬欠陥として、前述したプラスチックボールベースが埋設されており、埋設後は表面を平らにするために木の板を置き、その上から加重を掛けて土の締固めを行っている。

模擬欠陥の埋設位置を図7に示す。埋設されている数は3つとなっている。今回の実験における目的が埋設深度の影響を検証することであるため、埋設深度をそれぞれ50, 100, 150 mmを想定して配置した。しかし、計測後に改めて深さを計測したところ、想定とは異なる深度になっていた。図7における括弧内の数値が実測値である。このようなこともあり、埋設深度の変化が少ないため、前述した伝搬時の減衰よりも土量の方が計測結果に与える影響が大きいと推測される。なお

図中の右下は埋設物が存在しておらず、健全な状態を想定している。

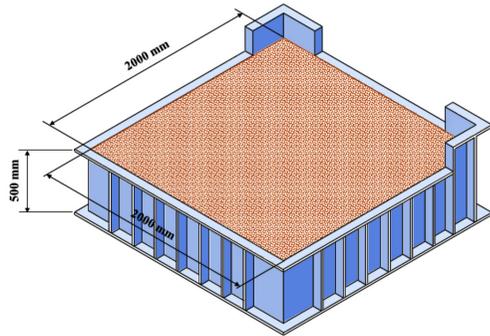


図6 埋設物試験場

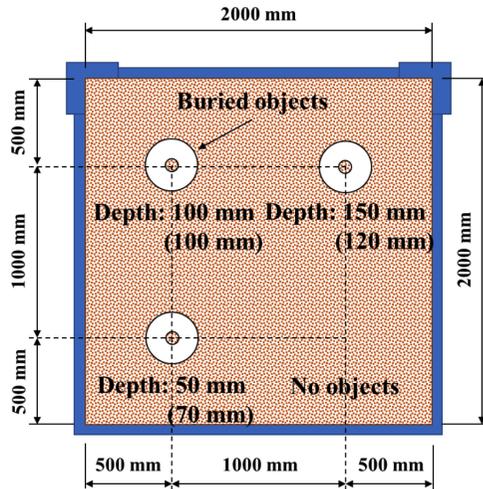


図7 模擬欠陥埋設位置

IV. 実験方法

1. 実験セットアップ図

実験セットアップ図を図8に示す。実験では加振用音源である平面音源をイレクターパイプ (Yazaki Kako Corp.) により組まれた台の上配置し、埋設物試験場の横に三脚を立ててその上にレーザドップラ振動計を固定して計測が行われた。今回の計測対象は埋設深度50, 100, 150 mmおよび埋設物無しの4種類である。しかし、実験時の器材配置の関係からレーザドップラ振動計は図中の右側

に固定されているため、レーザドップラ振動計から距離が近い 50 mm および埋設物無し、そして距離が離れている 100 mm および 150 m では計測時のレーザ距離および計測角度に差異が発生している。

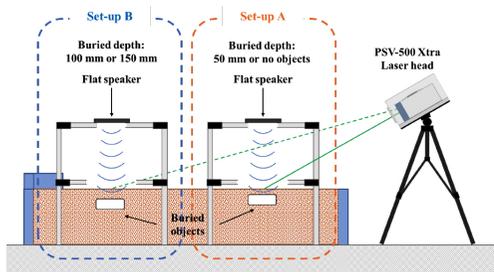


図 8 実験セットアップ図

非接触音響探査法の走査時の計測範囲例を図 9 に示す。計測範囲は縦 410 mm、横 460 mm 程度の大きさである。

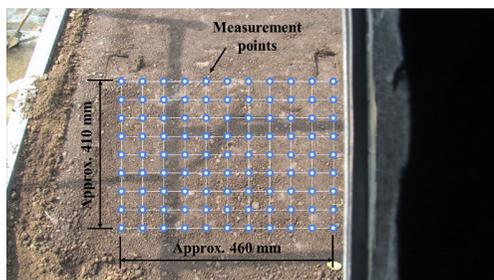


図 9 計測範囲例（埋設深度：50 mm）

各埋設深度における計測時の設定を表 1 および表 2 に示す。表 1 は計測用レーザから見て手前側、表 2 は奥側の計測対象における計測設定である。加振音源は埋設物直上に配置しているため距離に差はほぼないが、前述した様にレーザの距離および計測角度に差異が生じている。計測ポイント数はすべて縦 9 × 横 11 ポイントに設定されており、計測した 99 ポイントのデータを使用して、二次元の分布を作成して比較・検討を行う。

2. 使用波形

音響加振に使用した波形を図 10 に示す。使用した波形は周波数範囲 50–152 Hz、パル

表 1 計測設定：埋設物無し、埋設深度 50 mm

	No objects	Buried depth: 50 mm
Laser distance [m]	1.09	1.02
Sound source distance [m]	0.70	0.71
Laser angle [deg]	47.0	51.7
Average number of times	5	5
Maximum sound pressure level [dB]	99.0	99.0
Number of measurement points	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

表 2 計測設定：埋設深度 100 mm、150 mm

	Buried depth: 100 mm	Buried depth: 150 mm
Laser distance [m]	1.86	1.97
Sound source distance [m]	0.71	0.71
Laser angle [deg]	29.0	29.0
Average number of times	5	5
Maximum sound pressure level [dB]	99.0	99.0
Number of measurement points	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

ス幅 60 ms、変調周波数 17 Hz のシングルトーンバースト波⁵⁾である。なお、計測時の音圧は計測対象面で 99 dB (Z 特性最大値) 程度の大きさになる様に設定された。

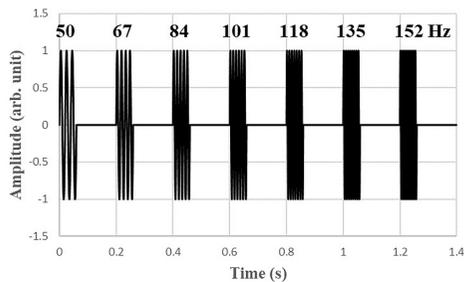


図 10 使用波形

V. 結果と考察

検出された結果について、振動エネルギー比 (VER: Vibration Energy Ratio) を用いて検討を行った。振動エネルギーを用いる利点として、共振周波数の異なる複数の欠陥を

包括的に検出可能である点が挙げられる。振動エネルギー比の定義を式(1)に示す。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{each}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{min}) df} \quad (1)$$

PSD (Power Spectral Density) each は各計測点のパワースペクトル密度、PSD min は各計測点におけるパワースペクトル密度の最低値の点を示している。今回の検討では複数の結果を比較するため、4回分の計測結果(99ポイント×4)における最低値を基準に、それぞれ振動エネルギー比分布を作成した。

図11から図14が埋設深度別の振動エネルギー比分布である。黒色に近い程振動エネルギーが高く、対象面の振動が大きい事を示している。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。

埋設深度 50 mm の結果では、円形の埋設物の反応が明確に検出されており、大きな振動が検出されている。100 mm の結果では、50 mm ほど強くはないが埋設物が検出されていることが確認できる。150 mm では周囲のノイズが増加するため不明瞭にはなるが、埋設物の反応は確認可能である。

埋設物無しでは、大きな反応はなく想定通りの結果となった。しかし、計測範囲の外縁部付近に小さくはあるがいくつか反応が存在していることが確認できる。これは 150 mm の結果でも散見されているが、原因としては計測対象の土の状態が影響していると考えられる。前述した模擬欠陥埋設後に行う土の締固めだが、埋設物試験場すべての範囲を加圧しているわけではなく、端の部分では締固めが出来ていない部分が存在していた。そのため、その場所が非常に揺れやすい状態になっており、今回の埋設物無しおよび 150 mm の結果においてノイズとして検出されたと考えられる。

各埋設深度における代表点の振動速度スペクトルを図15に示す。埋設物の周波数ピークに着目すると、それぞれ 100 Hz 付近に大

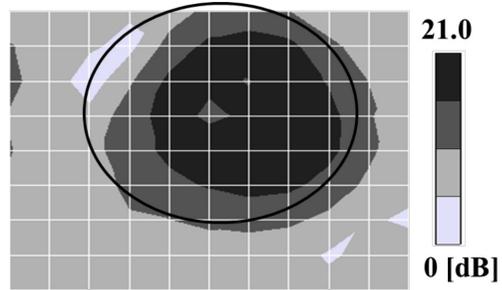


図11 振動エネルギー比分布図 (75-125 Hz)
埋設深度：50 mm

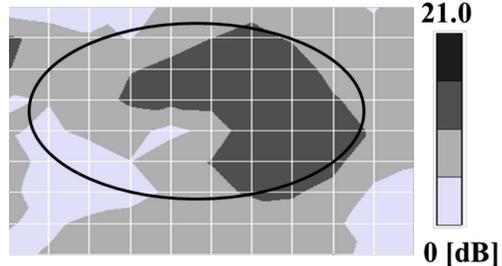


図12 振動エネルギー比分布図 (75-125 Hz)
埋設深度：100 mm

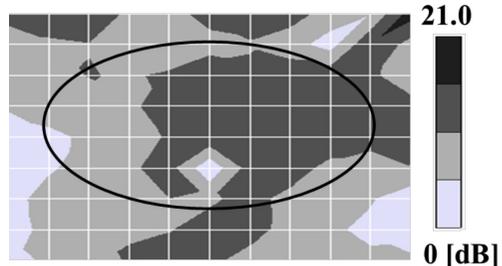


図13 振動エネルギー比分布図 (75-125 Hz)
埋設深度：150 mm

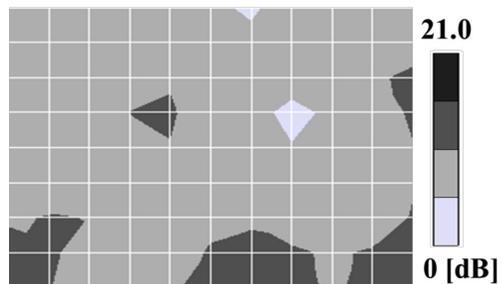


図14 振動エネルギー比分布図 (75-125 Hz)
埋設物無し

きな反応が存在しており、埋設深度が変化しても周波数が変化していないことが分かる。これはたわみ振動の傾向とは合致しない。し

かし、埋設深度深くなるほど振幅値が低下しており、想定していた通りに埋設物上の土量の変化が振幅値に影響したと考えられる。埋設深度 100 mm および 150 mm の差異が少ない理由としては、実際の埋設深度が想定しているよりも差が少なくなってしまったことが理由に挙げられる。埋設物が無い状態の計測結果では、他と比較して大きな反応は検出されず、埋設物の有無で大きな差異があることが分かる。

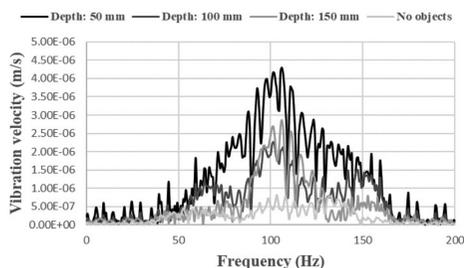


図 15 振動速度スペクトル：埋設深度別

VI. まとめと今後の課題

今回の検証実験の結果から、土中の浅層領域を対象とした非接触音響探査法により、直径 300 mm のプラスチックポールベースであれば、150 mm 程度の深さに存在していても検出可能であることが分かった。

今後は音源が搭載された UAV を用いて計測を行う予定である。

謝辞

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の支援を受けたものである。

【参考文献】

- 1) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: IEEE Int. Ultrasonics Symp., p.744 (2011).
- 2) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp., p.84 (2011).
- 3) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura: Jpn. J. Appl. Phys. Vol.52, 07HC12 (2013).
- 4) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., p.94 (2012).
- 5) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., p.1303 (2013).
- 6) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura: Jpn. J. Appl. Phys. 52, 07HC12 (2013).
- 7) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 53, 07KC15 (2014).
- 8) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura: JJAP, Vol.54, 07HC15 (2015).
- 9) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura: JJAP, Vol.56, 07JC10 (2017).
- 10) T. Abe and T. Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. 49, 07HC15 (2010).
- 11) T. Sugimoto and T. Abe: Jpn. J. Appl. Phys. 50, 07HC18 (2011).
- 12) 上地樹他, 音講論 (春), 1-6-6, (2022).
- 13) I. Uechi, and T. Sugimoto: Toin Ronso, 44, pp.123-128 (2021).