

令和 2 年度 防衛装備庁  
安全保障技術研究推進制度

## 研究成果報告書

UAV を用いた音波照射加振による浅層地中探査技術の基礎研究

令和 3 年 5 月

桐蔭横浜大学（学校法人桐蔭学園）

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、学校法人桐蔭学園が実施した令和2年度「UAVを用いた音波照射加振による浅層地中探査技術の基礎研究」の成果を  
取りまとめたものです。

## 目 次

1. 委託業務の目的	1
1.1 研究課題の最終目標	1
1.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題	1
1.3 要素課題に対する攻略手段と実施項目及びそのための体制	2
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度	3
2.1 探査深度について	3
2.2 探査精度について	3
2.3 探査距離について	3
3. 委託業務における研究方法及び成果	4
3.1 埋設物試験場の設計製作	4
3.1.1 厚木の埋設物試験場（珪砂、シルト土、赤土）	4
3.1.2 つくばの埋設物試験場 1（シルト土）	5
3.1.3 つくばの埋設物試験場 2（関東ローム土、赤土）	6
3.1.4 まとめ	7
3.2 市販音源を用いた音波照射による地表面振動の計測	8
3.2.1 珪砂の場合	8
3.2.2 ローム土の場合	22
3.2.3 シルト（つくば表層土）の場合	51
3.2.4 赤土の場合	60
3.2.5 まとめ	78
3.3 照射音波波形の最適化による計測速度の改善	79
3.3.1 計測速度の改善	79
3.3.2 埋設物の大きさに応じた周波数と加振力の調整	81
3.3.3 加振力の違いが映像結果に及ぼす影響	84
3.3.4 まとめ	87
3.4 UAV を用いた計測システムの構築	88
3.4.1 試作した音源搭載型 UAV の概要と計測システムの構築	88
3.4.2 UAV の改良と検証	90
3.4.3 まとめ	96
3.5 構築した計測システムを用いた埋設物試験場での計測	97
3.5.1 UAV 飛行時の基礎実験	97
3.5.2 UAV 着陸時の基礎実験	109

3.5.3 UAV 改良による効果.....	114
3.5.3 まとめ.....	122
4. 委託業務全体の成果.....	123
4.1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果.....	123
4.2 研究課題の発展性（間接効果を含む）.....	124
4.3 研究成果の発表・発信に関する活動.....	124
5 プロジェクトの総合的推進.....	124
5.1 研究実施体制とマネジメント.....	124
5.2 経費の効率的執行.....	124
6 まとめ、今後の予定.....	125
6.1 本研究により得られた成果.....	125
6.2 今後の予定.....	126
7. 研究発表、知的財産等の状況.....	127
7.1 研究発表等の状況.....	127
7.2 知的財産等の状況.....	127
7.3 その他特記事項.....	127
謝辞.....	127
参考文献.....	128
付録.....	129
A 陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性について.....	129
B 陸装研・管理土槽室にて 2019 年 8 月に実施した実験内容表.....	130
C 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーについて.....	131
D UAV を着陸させた状態の計測について.....	132
E メディアンフィルターについて.....	134
F 埋設物があることによる共振周波数の変化について（実際の地雷との比較）.....	135
G ホーロー容器の共振周波数について.....	142
H レーザ軸方向振動速度に及ぼす振動速度分布とレーザ入射角の影響.....	147

# 1. 委託業務の目的

## 1.1 研究課題の最終目標

本研究では、音源搭載型 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) からの音波照射加振による浅層地中探査の実現を目的とした、非接触音響探査法の基礎研究を実施する。このため、3年間の研究において、まず、埋設物試験場を構築した上で、様々な市販音源を用いた音波照射による地表面の振動を長距離レーザドップラ振動計 (LDV : Laser Doppler Vibrometer) を用いて計測し、地表面の振動速度分布やその時間変化より計測原理や探査条件等を明らかにするとともに、浅層地中探査に必要とされる音源等の機材の選定を行う。次に、選定した音源を搭載した UAV の試作を行い、無線制御による音波照射及び LDV との協調計測システムを構築する。埋設物試験場にて実際に計測を行い、照射音波波形の最適化を行うとともに、UAV を用いた音波照射加振による浅層地中探査法における広範囲計測及び計測速度に関する知見を得ることを目標とする。

本研究において最終目標とする探査性能は、以下のとおりである。

- ・探査可能深度：0～300 mm 程度（音源の音圧依存）
- ・探査精度（最小探知物の大きさ）：直径 100～300 mm 程度（計測点の密度に依存）
- ・探査距離：100 m 程度（長距離 LDV の性能に依存）

## 1.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1) で示した最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題は以下の通りである。

### ① 音波照射加振による浅層地中探査の計測原理や探査条件等の解明

音波照射加振を用いて浅層地中に振動エネルギーを与えた場合の地表面の振動速度分布やその時間変化から、埋設物の探査を実現するための計測原理や探査条件等を解明することが課題となる。また、埋設物の大きさ、あるいは深さ及び照射音波の周波数との間関係性を明らかにする。

### ② 照射音波波形の最適化による計測速度の改善

UAV の飛行時間は限られているため、計測を高速に行う必要があるが、音波照射の時間が短すぎると埋設物に十分な振動エネルギーを与えることが出来ない。そのため、埋設物に対して効率的に振動エネルギーを与えられるように、照射音波波形を最適化することが課題となる。照射音波波形の最適化により計測速度が改善し、限られた飛行時間で広範囲を探査できるようになることが期待される。

### 1.3 要素課題に対する攻略手段と実施項目及びそのための体制

これらの要素課題に取り組むために、桐蔭横浜大学大学院工学研究科では、②～⑥を実施する。また、佐藤工業株式会社技術研究所では、①を実施する。

- ① 埋設物試験場の設計製作（担当：佐藤工業株式会社技術研究所）  
UAV からの音波照射加振による浅層地中探査を検証するために必要な、埋設物試験場の設計及び製作を行う。
- ② 市販音源を用いた音波照射による地表面振動の計測  
（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
長距離レーザドップラ振動計を用いて、音波照射による地表面振動の計測を行い、計測原理や探査条件等を明らかにする。
- ③ 照射音波波形の最適化による計測速度の改善（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
埋設物に対して効率的に振動エネルギーを与えることができるよう、照射音波波形の最適化を図り、計測速度の改善について検討を行う。
- ④ UAV を用いた計測システムの構築（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
UAV に搭載する音源等の機材を選定するとともに、選定した音源を搭載した UAV を試作し、無線制御による音波照射システム及び LDV との協調計測システムを構築する。
- ⑤ 構築した計測システムを用いた埋設物試験場での計測  
（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
構築した計測システムを用いて埋設物試験場での計測を行い、総合的な探査性能の検証を行う。
- ⑥ プロジェクトの総合的推進（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
プロジェクト全体を円滑に運営していくため、研究推進委員会を適宜開催する。必要に応じて研究協力者（アドバイザー）からの意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。

## 2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

研究目標毎の達成度を以下に記す。なお、今回の研究では、埋設物としてはすべて中空の円形容器を、音源としては UAV への搭載を考慮し、軽量の平面音源を用いている。

### 2.1 探査深度について

探査深度目標としては、音源の音圧に依存するものの 0~300 mm 程度であると予測した。今回の実験結果からは、探査可能深度と探査可能な埋設物の大きさにはトレードオフがあり、土壌種類や状態（含水率、締固度）や音圧にも影響されるが、おおよそ埋設物直径の約半分程度の深さが、UAV に搭載可能な平面音源で探査可能な深さであると思われる。

埋設物の直径約 300 mm の場合、探査可能な最大深度は約 100~150 mm 程度

埋設物の直径約 200 mm の場合、探査可能な最大深度は約 100 mm 程度

埋設物の直径約 100 mm の場合、探査可能な最大深度は約 50 mm 程度

すなわち、例えば直径 600 mm の埋設物であれば、深さ 300 mm でも検出できる可能性があることを意味している。また、今回の埋設物の検出周波数帯域が約 300 Hz 以下の低周波であったことを考えると、低周波に特化した大型のウーファーの方が音源として探査には適していると言える。しかしながら、その場合には音源部の重量が UAV の搭載可能なペイロードを超えてしまい、UAV により加振領域を自由に変更できるという最大の利点が失われてしまうことになるため、今回は平面音源のみを使用した（ただし、平面音源の場合、地表面までの距離に依存するが音圧としては地表面で最大 100 dB 前後程度である）。

### 2.2 探査精度について

探査精度としては、計測点の密度に依存するものの、直径 100~300 mm 程度であると予測した。本研究では、埋設物として直径 100~300 mm のものを実際に使用しており、探査可能深度は埋設物の大きさや土壌により影響を受けるものの、大きさ的にはほぼ目的を達成していると言える。ただし、この範囲外のものが計測できないというわけではなく、探査深度の項で述べたように埋設物のおよそ直径の半分程度の深さのものが検出可能である。

### 2.3 探査距離について

探査距離については、長距離 LDV の性能に依存して、100 m 程度以内であると予測した。本研究では、2019 年度の陸上装備研究所・管理土槽室にある乾燥した関東ローム土を用いて、直径 300 mm の埋設物が LDV から離隔 20 m でも検出できることを確認している。ただし、この結果は LDV ヘッドの高さが 2 m 時の結果であり、使用した LDV（赤外線レーザー 1550 nm, 10 mW）の性能を考えると、LDV ヘッドの高さを約 10 m に設定できれば、土表面へのレーザーの入射角度は 20 m 時と変わらないため、100 m の離隔であっても特に問題なく検出できると思われるため、達成しているといえる。

### 3. 委託業務における研究方法及び成果

#### 3.1 埋設物試験場の設計製作

##### 3.1.1 厚木の埋設物試験場（珪砂、シルト土、赤土）

厚木にある佐藤工業(株)技術研究所内に、今回の探査実験用として埋設物試験場(2×2×0.5 m<sup>3</sup>)を作成した。外観図を図 3.1.1.1 に示す。この埋設物試験場は屋外にあるために車輪で移動可能な屋根も併せて製作して頂いている。また、加圧は2枚のコンパネ板の裏に約20袋の砂利入り土嚢袋により行うことができる。この試験場を用いて、珪砂7号、つくばの表層土（シルト）、赤土（グラウンド土）を用いた実験が実施された。

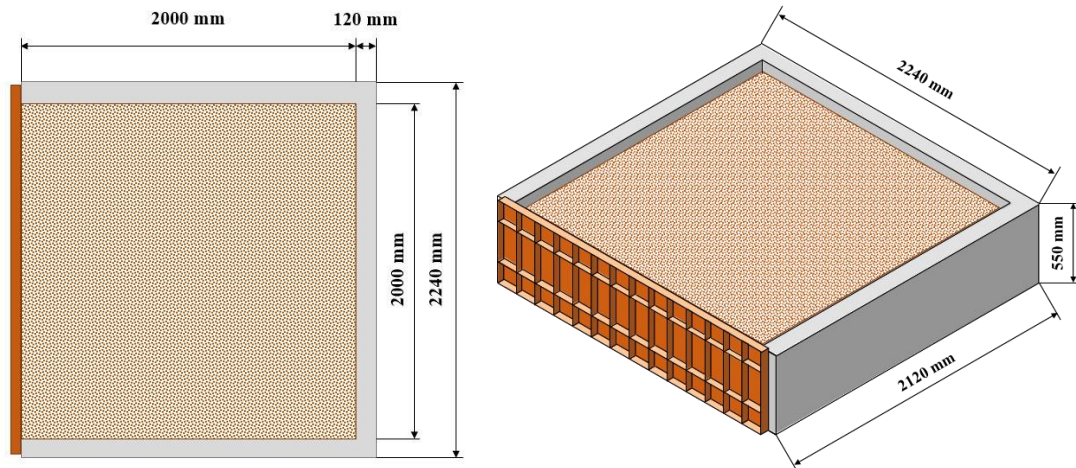


図 3.1.1.1 埋設物試験場



図 3.1.1.2 埋設物試験場の写真



### 3.1.2 つくばの埋設物試験場 1 (シルト土)

厚木に製作された埋設物試験場は、UAV を飛行させた状態での実験を行うにはやや手狭であることが問題となっていた。そのため、自由に飛行できかつ浅層地中に埋設可能な場所を探していた。幸いなことに、佐藤工業(株)技術研究所の移転地である、つくば市の造成地が短期間(2019年12月～2020年3月)であれば利用可能ということであったので、ここを臨時的埋設物試験場とした。また、実験時の時点でこの場所は人工集中地区(DID: Densely Inhabited District)ではなく、UAVの飛行許可もいない場所であったが、安全のため、造成地のほぼ中央部を試験場所としている。なお、この造成地の表層土は粘土質のシルトであった。

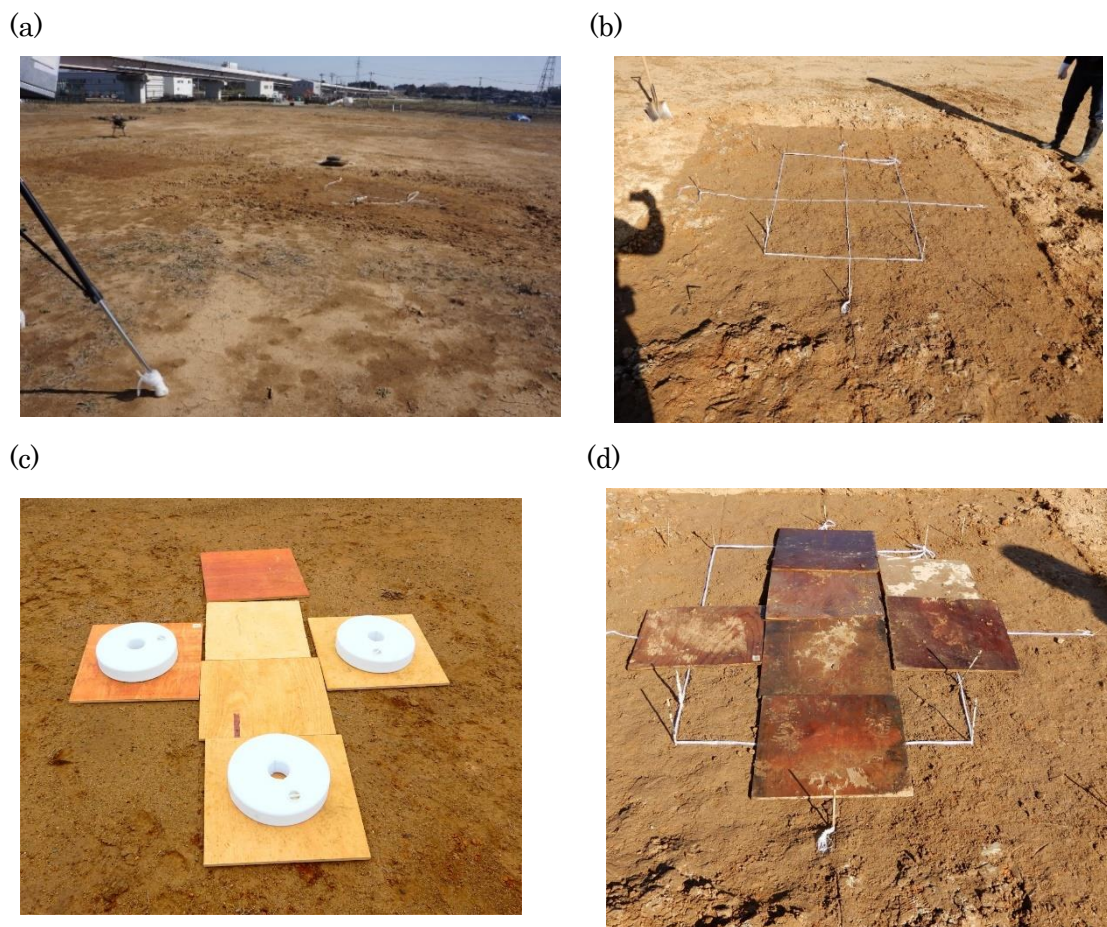


図 3.1.2.1 つくばの埋設物試験場 1 の写真

- (a) 実験場所の全景、(b) 埋設物試験場の様子 (2020年1月21日)
- (c) 埋設物の配置プラン(2019年12月17日)
- (d) 加圧板と目印用のテープとの位置関係 (2020年1月21日)

### 3.1.3 つくばの埋設物試験場 2（関東ローム土、赤土）

つくば市にある佐藤工業㈱技術研究所の移転先である造成地の一角に、探査実験用として埋設物試験場 2 ( $2 \times 2 \times 0.5 \text{ m}^3$ ) を製作した。関東ロームを用いた試験場の外観図を図 3.1.3.1 に、赤土を用いた試験場の外観図を図 3.1.3.2 に示す（寸法外観はどちらも同じ）。この埋設物試験場は屋外にあり、実験以外の時には、ブルーシートで覆い、飛ばされないようにロープと土嚢で固定して保存した。また、加圧は 2 枚のコンパネ板の裏に約 20 袋の砂利入り土嚢袋を載せることにより行うことができる。この試験場を用いて、2020 年 10 月に関東ロームおよび赤土を用いた実験が実施された。図 3.1.3.3 は、試験場の写真、および実験風景の写真である。

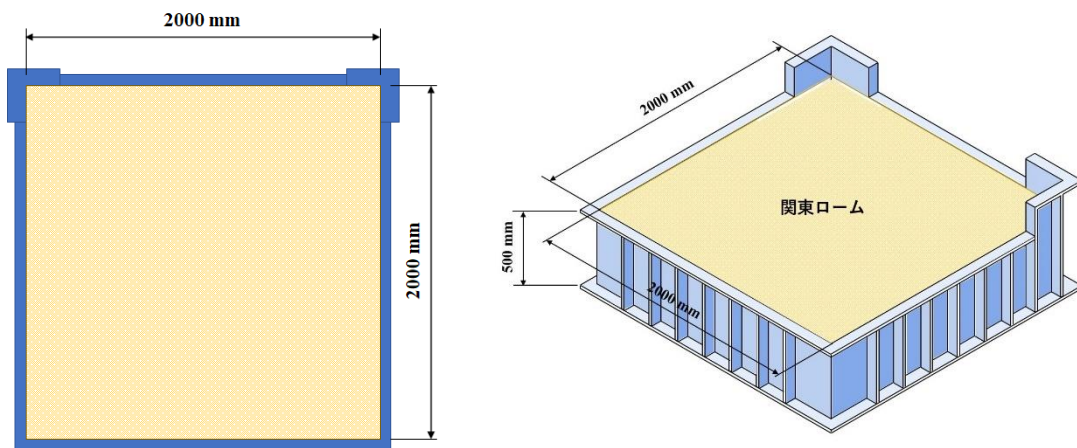


図 3.1.3.1 つくばの埋設物試験場 2（関東ローム土）

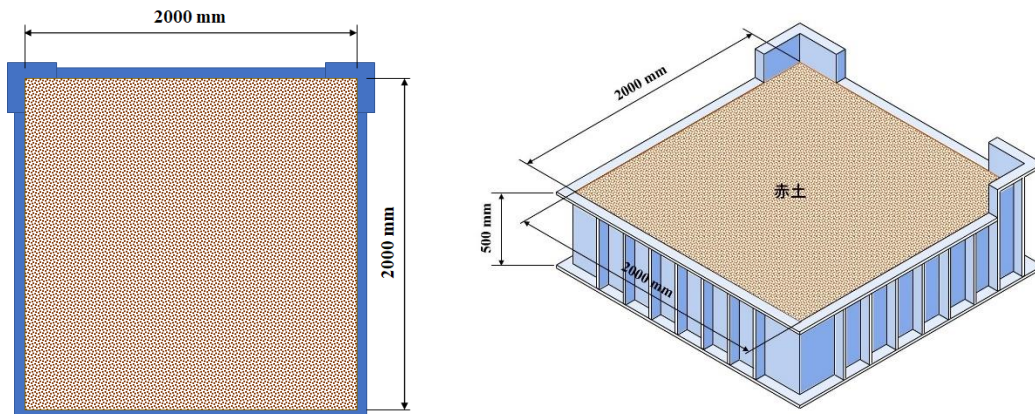


図 3.1.3.2 つくばの埋設物試験場 2（赤土）



図 3.1.3.3 埋設物試験場の写真(2020年10月12日)

#### 3.1.4 まとめ

UAVの飛行実験も想定していたために、本来は比較的広い場所での実験を希望していたが、実際にはつくばの埋設物試験場1のみが、この条件に適合していた。厚木における埋設物試験場でも、飛行実験は試行されたが、 $2 \times 2 \text{ m}^2$ とやや手狭であり、人や機材との距離も十分には離せなかったために、安全のために主な飛行実験はつくばの埋設物試験場1で実施されている。また、つくばの埋設物試験場2では、赤土と関東ローム土の実験が行われたが、実験に使用した関東ローム土は相模原にある陸上装備研究所の管理土槽室から移設したものであり、実験後に返却されている。

## 3.2 市販音源を用いた音波照射による地表面振動の計測

### 3.2.1 珪砂の場合

#### 3.2.1.1 小型砂槽を用いた実験結果 1 (埋設物の大きさと深さ)

##### (実験セットアップ)

大型の埋設物試験場が完成する前に、基礎特性を把握するために小型砂槽(500×500×300 mm<sup>3</sup>)を用いた実験が行われた。砂槽内に埋設された、直径 100 mm および 160 mm の中空円形容器に対して、音波照射加振による非接触音響探査法<sup>1-10)</sup>を用いた基礎実験を実施した。図 3.2.1.1 に実験セットアップ図を示す。実験の再現性を重視して、粒度分布約 0.3～0.05 mm の珪砂 7 号を土壌として用いた。

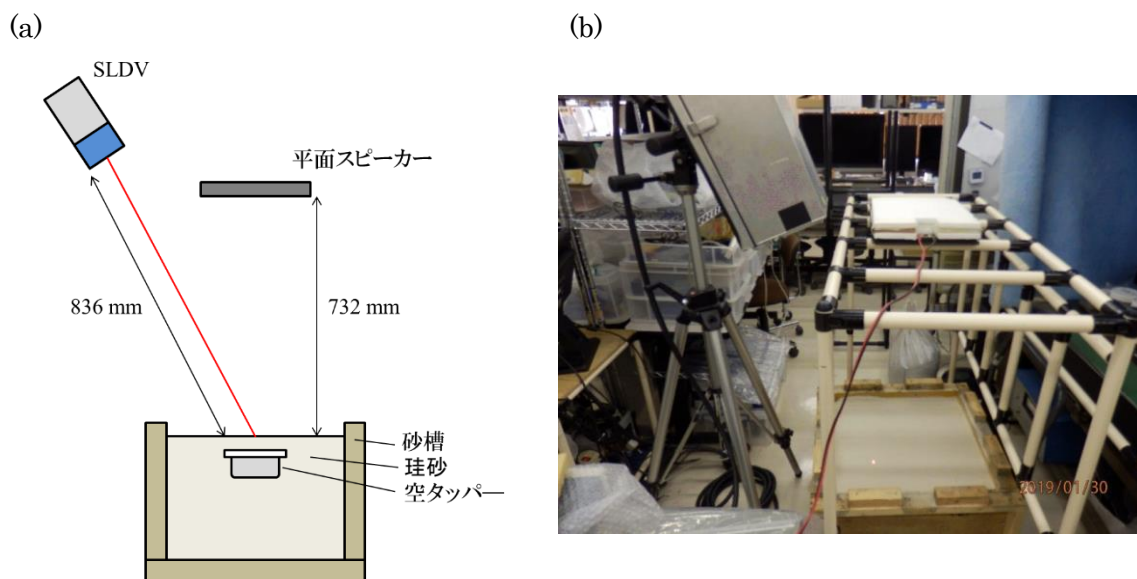


図 3.2.1.1 実験セットアップ (a) 実験セットアップ図、(b) 実験風景

試験用埋設物としては市販の円形容器を使用した(図 3.2.1.2 参照)。直径はそれぞれ 100 mm と 160 mm で重量はそれぞれ 52.8 g と 115.8 g である(蓋部: ポリエチレン、本体部: ステンレス)。埋設時は砂の圧力で蓋が外れないように、蓋の縁から本体の側面まで養生テープを貼った状態で埋設した。

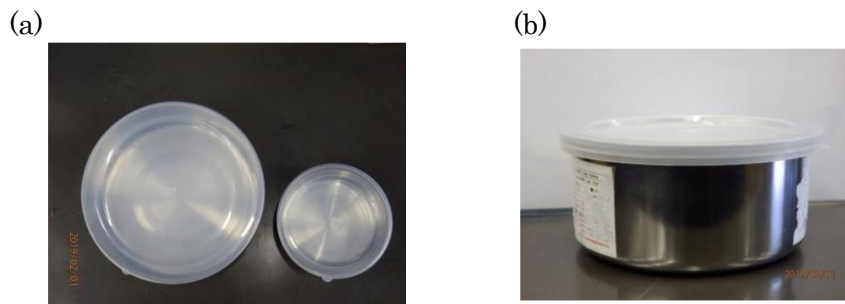


図 3.2.1.2 埋設物 (a) 上面、(b) 側面

実験に用いる砂槽(500×500×300 mm<sup>3</sup>)には約 99 kg の珪砂を入れ、埋設物を設置後、測定前日から約 24 時間砂袋(約 26 kg)の加圧を行った。珪砂上に木板を置き、その上に加圧用砂袋を置くことで加圧している。平面音源(FPS 社, FPS2030M3P1R)とスキニング振動計 (SLDV, ポリテックジャパン社, PSV400-H4, He-Ne レーザ)を使用して、音波加振時の珪砂表面の振動速度を測定した。珪砂表面から各装置までの距離はそれぞれ約 732 mm と約 836 mm であった。加振用音波は 2 種類のシングルトーンバースト波<sup>1,6)</sup>を使用した。1つ目のトーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100Hz ~1 kHz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 50 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 950 ms である。2つ目のトーンバースト波のパラメータは周波数範囲 1 kHz ~6 kHz、変調周波数 100 Hz、パルス間インターバル 25 ms、パルス幅 5 ms、波形の長さは 1.275 s である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 95 dB (Z 特性) とした。

### (実験結果)

深さ 50 mm に埋設した直径 100 mm の円形容器に対して周波数範囲 100 Hz~1 kHz の音波を照射した時の埋設物直上と埋設物のない場所の振動の振動速度スペクトルを図 3.2.1.3 に示す。青線は埋設物直上(計測番号 62)、赤線は埋設物のない場所(計測番号 1)の振動の振動速度スペクトルである (計測番号はスキャンエリアの左上が 1 番で右下が 121 番)。図より埋設物上の珪砂が周囲より振動しやすい周波数がある事が確認できる。図 3.2.1.4 にスキャンエリアを示す。測定点数は 121 点(11×11 points)で、測定点間隔は縦横約 22 mm である。白線の丸は埋設物の位置と大きさを示している (この場合は 100mm)。この映像例は砂槽に対してやや斜めに設置した SLDV の CCD カメラの画像のため、埋設物の検出位置が、画面中央よりやや下寄りになっている (振動速度の大きい箇所が想定埋設位置の中心よりやや下に来ている理由については付録 H 参照)。

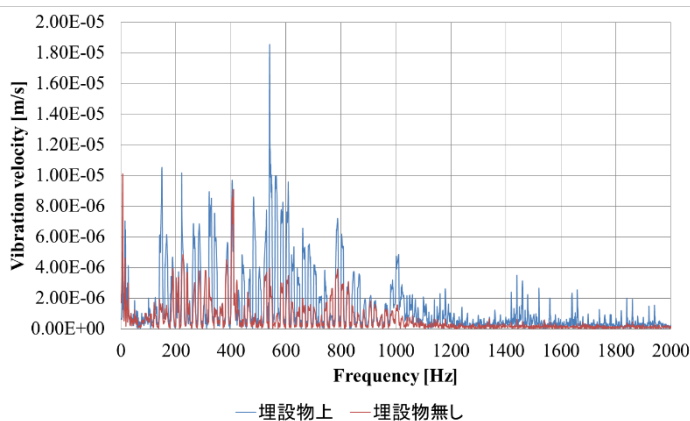


図 3.2.1.3 振動速度スペクトル

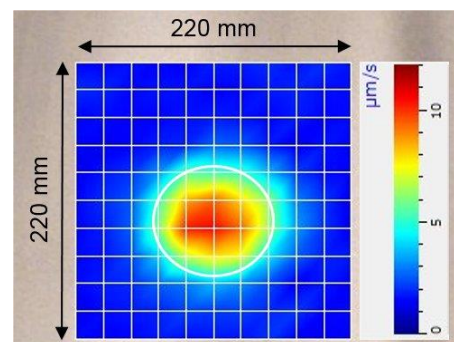


図 3.2.1.4 スキャンエリアと埋設物の位置と大きさ

次に図 3.2.1.3 において、埋設物上が周囲に比べて振動しやすい周波数における振動速度分布を図 3.2.1.5 に示す。

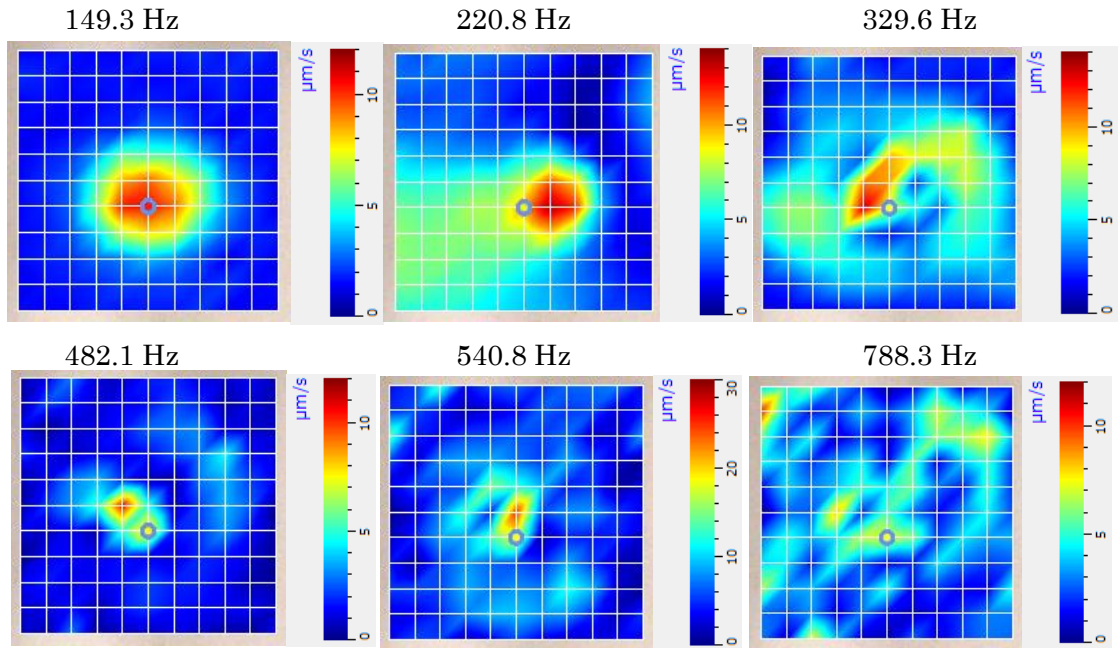


図 3.2.1.5 振動速度分布

図 3.2.1.5 より 300 Hz 以下に埋設物が影響していると思われる振動速度分布が明確に確認されることがわかる。同様にして周波数範囲 1~6 kHz の音波を照射した時の、埋設物上が周囲に比べて振動しやすい周波数における振動速度分布図を図 3.2.1.6 に示す。

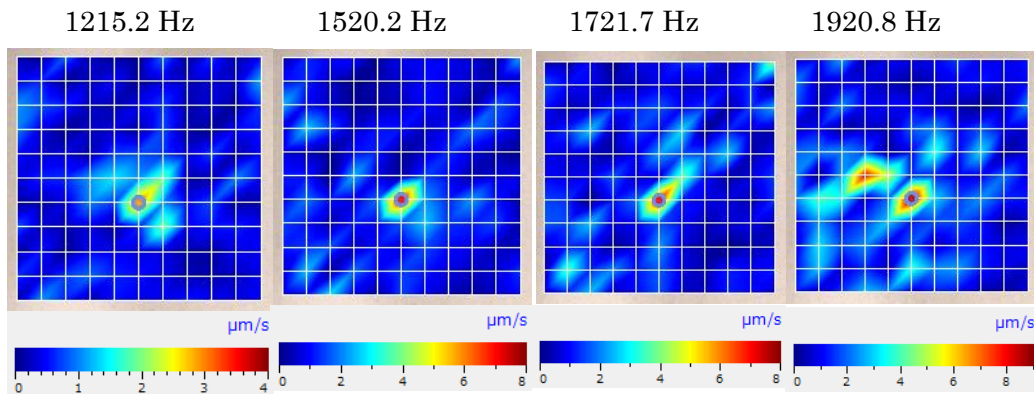


図 3.2.1.6 振動速度分布

図 3.2.1.6 より埋設物の中心付近が局所的に振動しやすい状況であった事が確認できる。ただし、この状況から、埋設物の有無を判定するのは難しいと思われる。

同様な実験を埋設物の深さ、大きさを変化させて行った。振動速度分布として埋設物が周囲に対して明瞭に検出(映像化)される周波数を基本検出周波数とした場合の検出結果例を図 3.2.1.7 に示す。この結果を用いて、埋設物の大きさおよび深さを变化させた場合の基本検出周波数を表 3.2.1.1 および表 3.2.1.2 に示す。

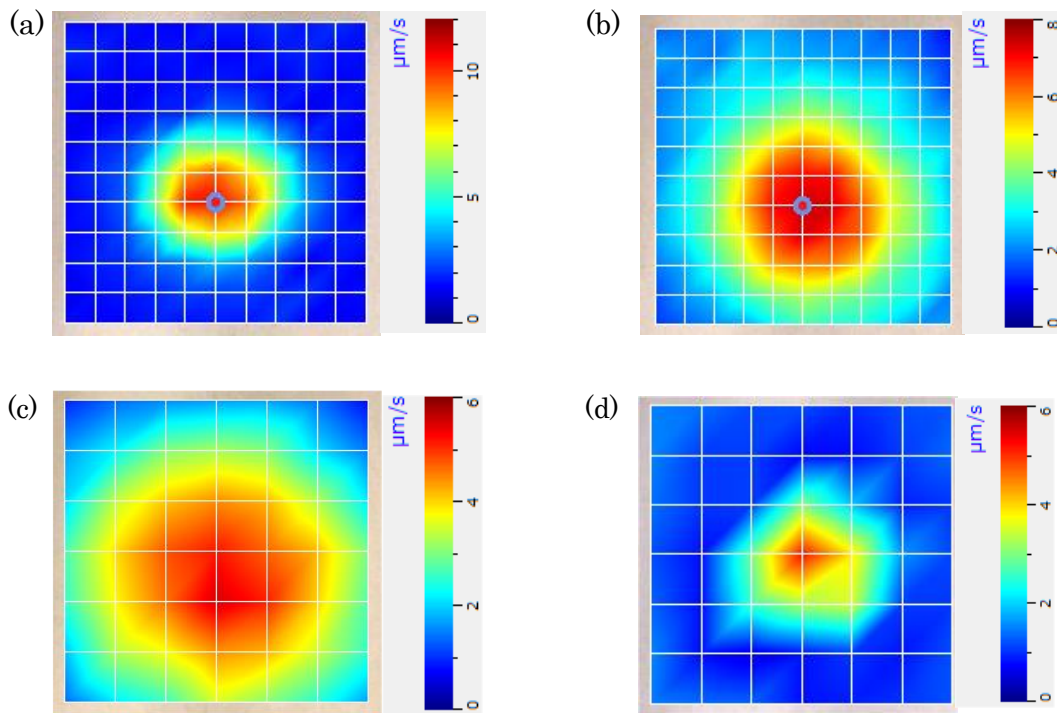


図 3.2.1.7 振動速度分布図 (a) 直径 100 mm, 深さ 50 mm, 基本検出周波数 149.3Hz  
 (b) 直径 100 mm, 深さ 100mm, 基本検出周波数 168.5Hz  
 (c) 直径 100 mm, 深さ 150 mm, 基本検出周波数 166.4Hz  
 (d) 直径 160 mm, 深さ 50 mm, 基本検出周波数 109.9Hz

表 3.2.1.1 直径と検出周波数

埋設物の直径	検出周波数
100 mm $\Phi$	149 Hz
160 mm $\Phi$	110 Hz

表 3.2.1.2 深さと検出周波数

埋設物の深さ	検出周波数
50 mm	149 Hz
100mm	167 Hz
150mm	167 Hz

表より、埋設物の直径は基本検出周波数と反比例するが、たわみ共振現象と異なり埋設物の深さを変化しても、基本検出周波数に大きな変化が見られないことがわかる（たわみ共振の場合には共振周波数は深さに比例する）。

#### (まとめ)

珪砂内に埋設された埋設物に対して音波照射加振を行い、埋設物の深さ、大きさと基本検出周波数（共振周波数）について検討した。その結果、検出される基本周波数は埋設物の大きさに反比例して変化することが明らかになった。一方、埋設物の深さを変えても検出される周波数はあまり変化しなかった。また、埋設位置を深くすると振動する領域が広がって

くことも判明した。これは、捉えられている物理現象がたわみ共振ではなく、埋設状態における容器自体の振動が捉えられているためと考えられる。

### 3.2.1.2 小型砂槽を用いた実験結果 2 (レーザの照射角度)

#### (実験セットアップ)

長距離から土壌表面の振動を測定するため、レーザ照射角度をどのくらいまで浅くできるかの基礎検討を小型砂槽(500×500×300 mm<sup>3</sup>, 珪砂 7 号充填)内に埋設された、直径 100 mm の中空円形容器 (蓋部: ポリエチレン、本体部: ステンレス) に対して、音波照射加振による基礎実験を実施した。図 3.2.1.8 に実験セットアップ図を示す。なお、埋設物を設置した後、測定前日から砂袋で加圧を行った。埋設物の砂表面からの深さは約 50 mm である。

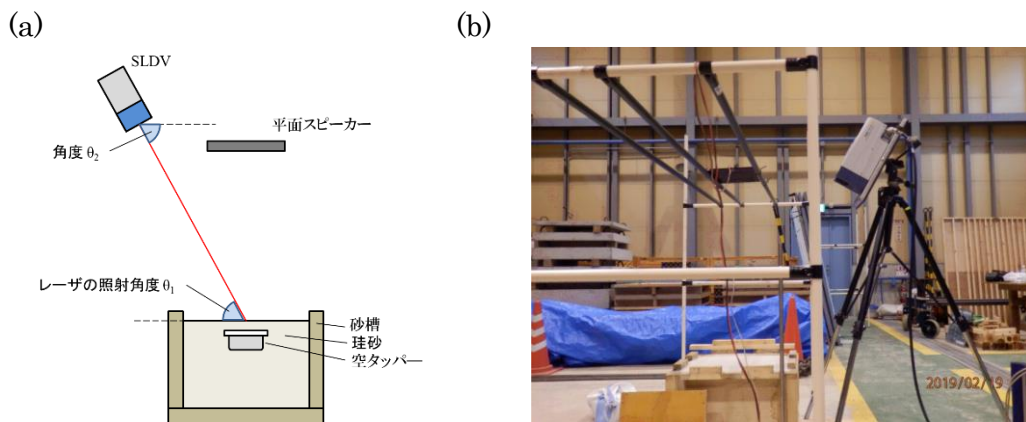


図 3.2.1.8 実験セットアップ (a) 実験セットアップ図、(b) 実験風景

平面音源(FPS INC, FPS2030M3P1R)を砂槽上方の約 1 m に設置し、珪砂表面の振動を測定する SLDV としては赤外線レーザの PSV-500 Xtra (ポリテックジャパン(株))を使用した。その際、防振ケースは使用しない事にした。今回検討したレーザの照射角度を表 3.2.1.3 に示す。レーザの照射角度については垂直入射を 90° としてデジタルアングルメーター(シンワ測定株式会社製)を用いて測定した(砂槽表面の傾斜は小さいと仮定)。

表 3.2.1.3 レーザの照射角度

レーザの照射角度[deg.]	68	60	45	35	30	20
レーザヘッドと測定面との距離[m]	1.004	1.121	1.212	1.082	0.92	0.828

測定に使用した音波はシングルトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100 Hz ~ 300 Hz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 200 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 1 s である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 90 dB とした。



## (実験結果)

図 3.2.1.9 にレーザの照射角度を変更した時の埋設物上の振動速度分布を示す。

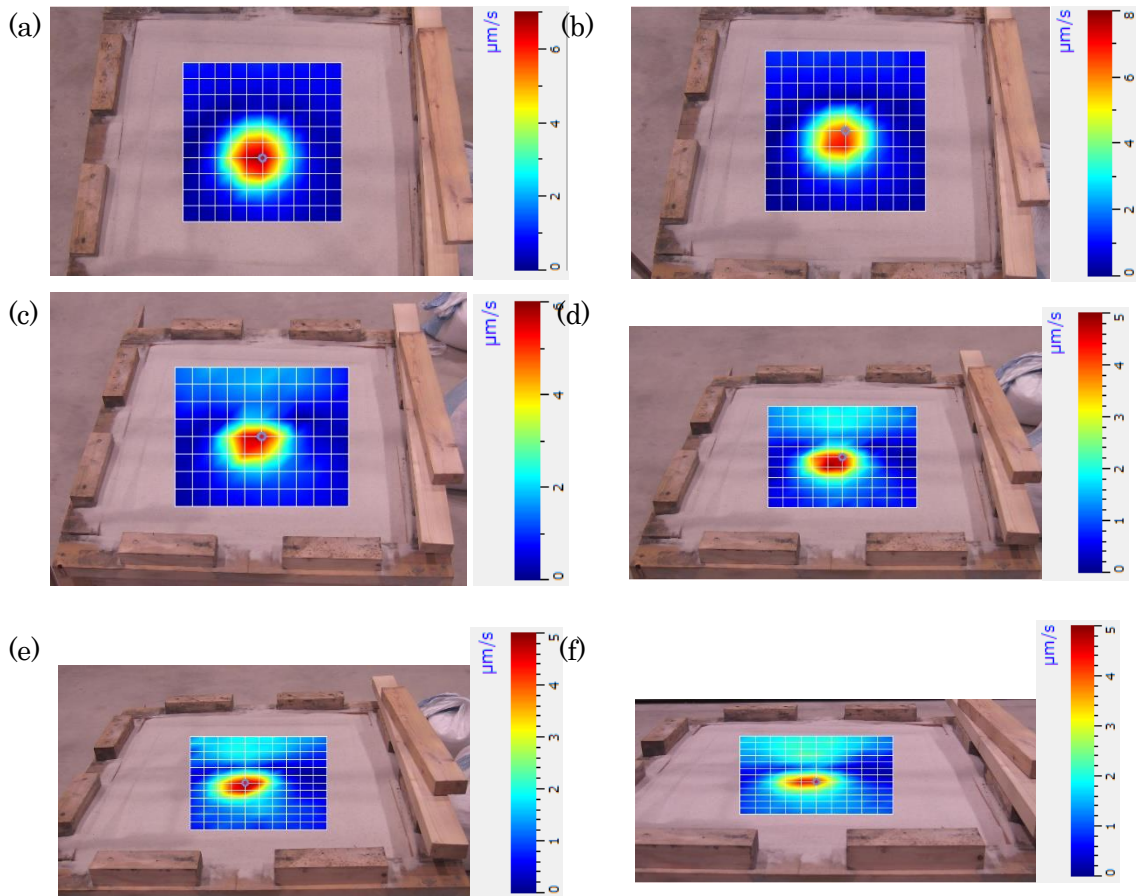


図 3.2.1.9 レーザの照射角度毎の振動速度分布 (映像化周波数:152 Hz、垂直入射:90°)

(a) 68°、(b) 60°、(c) 45°、(d) 35°、(e) 30°、(f) 20°

図 3.2.1.9 より埋設物の影響と思われる周囲より振動速度の値が高くなる傾向は、実験を行った全ての角度において確認できることがわかる。ただし、レーザの照射角度が 60° より小さくなると測定エリア上部に振動速度がわずかに周囲より高くなる傾向が出ている。これは砂槽の大きさの関係で出ている可能性もあるため、大型埋設物試験場で同様の傾向が確認されるか検討する必要があると思われる。

## (まとめ)

測定面に対してレーザの照射角度を変更した実験を行った。実験結果から、測定面とレーザヘッドの距離が約 1 m 程度では、レーザの照射角度を 68° から 20° まで変更しても埋設物を検出出来ることが確認された (垂直入射を 90° とする)。これは、使用した LDV が赤外線レーザであり高感度である事、珪砂がレーザ光を散乱しやすい事、および埋設物の深さが 50 mm と比較的浅い事なども影響していると思われる。

### 3.2.1.3 小型砂槽を用いた実験結果 3 (埋設深さ 50 mm以内)

#### (実験セットアップ)

埋設物を 50 mm 以内の極めて浅い領域に埋設した場合についても検討を行った。埋設物として使用した中空円形容器はフタ付きのホーロー容器 (蓋: ポリエチレン、本体: ホーロー) で、直径は 160 mm と 180 mm で重さはそれぞれ 161 g と 213 g である。ただし、埋設深度が極端に浅い場合に、容器上面の振動で砂を吹き飛ばしてしまわないように、埋設時は容器底面 (ホーロー部) が上方を向くようにした。砂槽 ( $500 \times 500 \times 300 \text{ mm}^3$ , 珪砂 7 号 充填) に、容器底面が露出した状態の埋設深さ 0 mm から約 40 mm までの測定を行った。埋設深さの調整は、砂槽の両サイドの同じ高さに取り付けた板を用いた。この板は砂の表面を平坦にならすためのものである。この板の上に厚さ 3 mm と 10 mm の板を重ね、砂を平坦にする事で埋設深さを調整した。なお、この測定では砂袋による加圧は行っていない。図 3.2.1.10 に実験セットアップを示す。平面音源(FPS 社, FPS2030M3P1R)と SLDV (ポリテックジャパン社, PSV400-H4, He-Ne レーザ) を使用して、音波照射加振時の珪砂表面の振動速度を測定した。珪砂表面から各装置までの距離はそれぞれ 787 mm と 896 mm である。

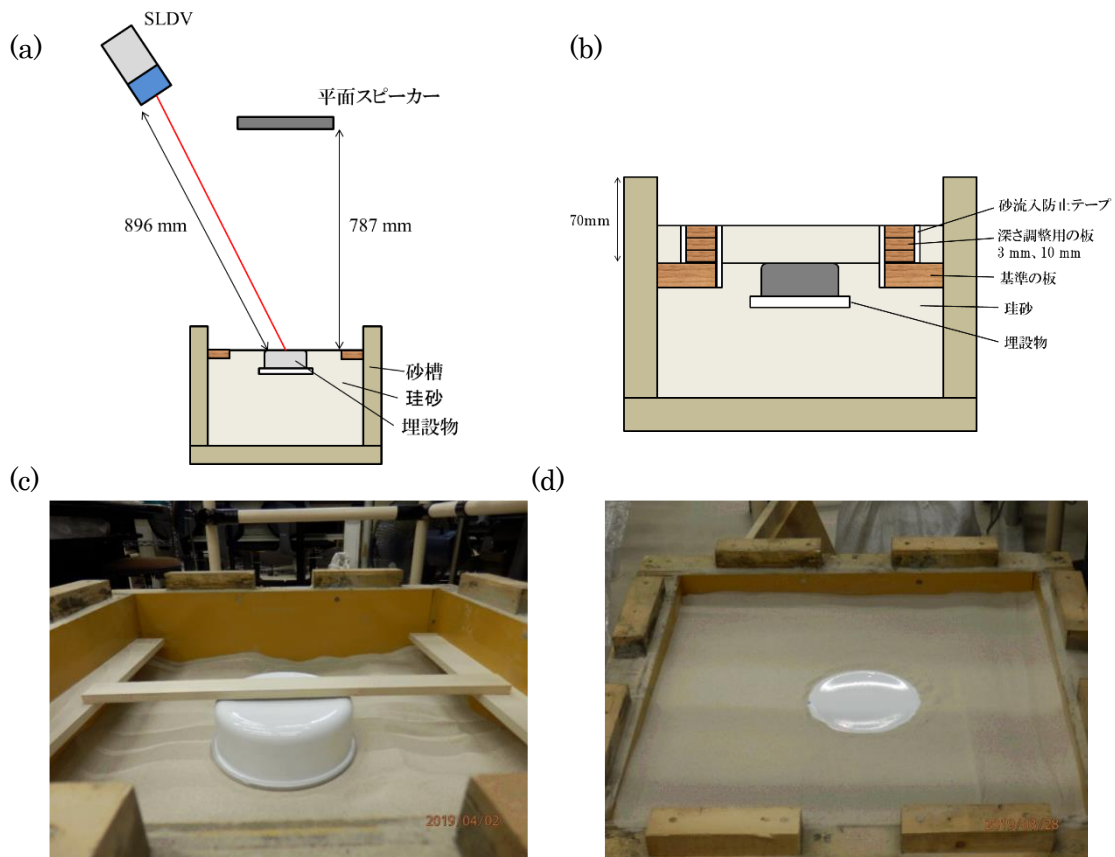


図 3.2.1.10 実験セットアップ

- (a) 実験セットアップ図、(b) 埋設深さ調整の概略図  
 (c) 砂槽の両サイドの板の配置、(d) 埋設深さ 0 mm 時の写真

測定に使用した音波としてはシングルトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100 Hz ～1 kHz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 50 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 950 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 95 dB である。図 3.2.1.11 にスキャンエリアを示す。測定点は 81 点(9×9 points)で、測定点間隔は 30 mm である。

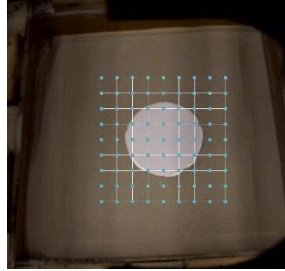


図 3.2.1.11 スキャンエリア (埋設されている容器径: 180mm)

#### (実験結果例)

埋設深さと共振周波数の変化を図 3.2.1.12 に示す。青と赤のマーカ―はそれぞれ埋設物の径が 160 mm と 180 mm の計測結果を示している。図より、どちらも深さ 0 mm～21 mm までは共振周波数の減少傾向がある。21 mm 以降は大きな値の変動は確認出来ない。2 つの測定結果はほぼ同様の傾向を示している事から再現性の高い現象であると思われる。

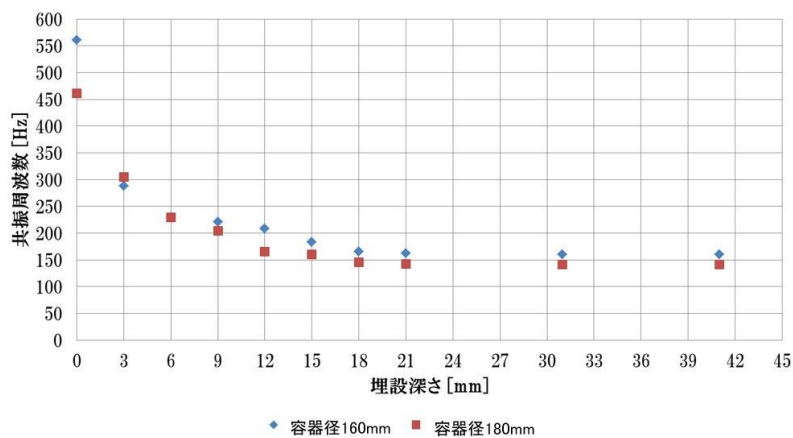


図 3.2.1.12 埋設深さ (0～40mm) と共振周波数の関係

#### (まとめ)

計測対象物を 50 mm 以下に埋設した場合の測定結果について検討を行った。実験結果より、深さ約 20 mm までは共振周波数の減少傾向があり、20 mm 以降ではほぼ一定の周波数となった。この原因は計測対象物の上側に砂粒子が被さり負荷がかかることで、境界条件が変化して比較的自由なたわみ共振から負荷がかかった状態での埋設物自身の共振へと遷移するためと思われる。この実験事実を利用すれば、実際探査を行う際に幅広い周波数の帯域をサーチする必要が無い可能性があり、周波数を調整した加振波形による高速計測が行える可能性も考えられる。

3.2.1.4 埋設物試験場における音波照射加振による基礎実験  
(実験セットアップ)

厚木の佐藤工業(株)技術研究所内に製作していただいた埋設物試験場(2×2×0.5 m<sup>3</sup>、珪砂7号充填)内に円形の埋設物(市販のホーローもしくはステンレス製容器、発泡スチロール及びプラポールベース)を配置した。図 3.2.1.13 に砂槽内の埋設物の設置位置を示す。また、図 3.2.1.14 に埋設前に砂槽表面に各埋設物を置いてみた写真を示す。設置深さは 50 mm、100 mm、200 mm および 300 mm である。

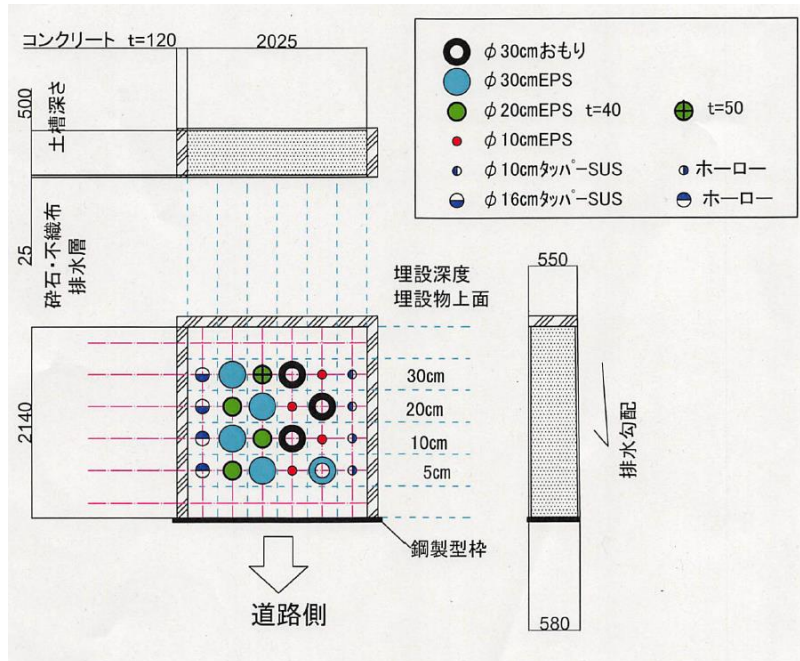


図 3.2.1.13 埋設物の設置位置

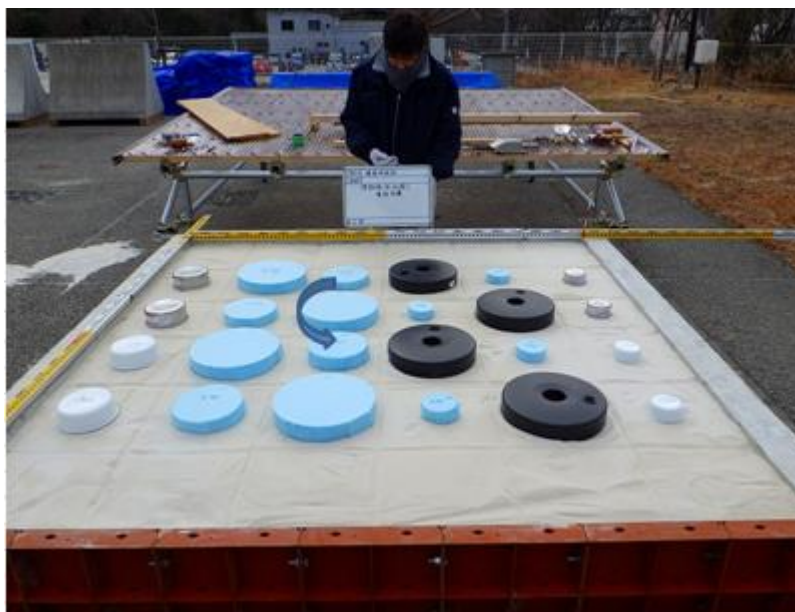


図 3.2.1.14 各埋設物の写真

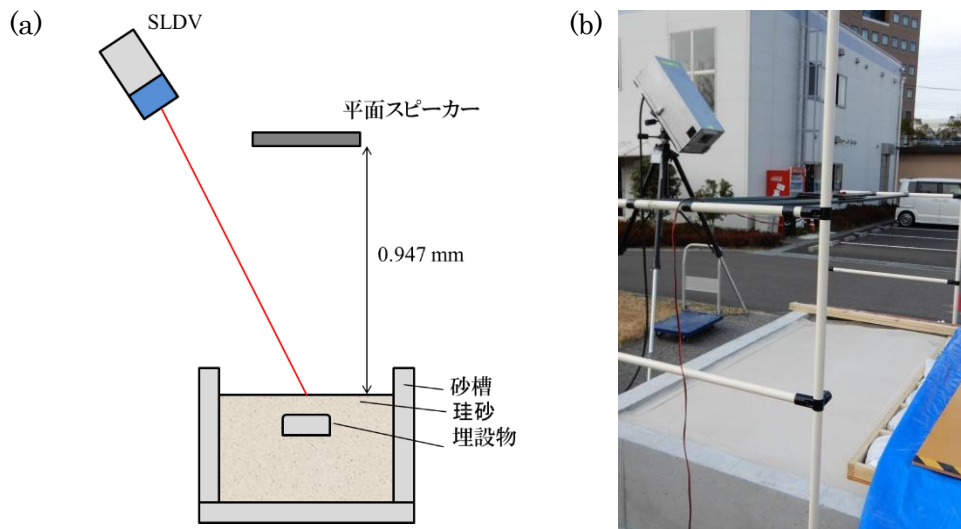


図 3.2.1.15 実験セットアップ

(a) 実験セットアップ図、(b) 実験風景

実験セットアップを図 3.2.1.15 に示す。平面音源(FPS INC, FPS2030M3P1R)を砂槽上方の 0.947 m に設置し、珪砂表面の振動を測定するための SLDV (ポリテックジャパン(株), PSV400-H4)は音源のやや斜め上に設置した。音波照射加振用の音波としてはシングルトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100 Hz ~1 kHz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 50 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 950 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 104 dB とし、測定時の加算平均回数は 5 回とした。ここでは、直径約 300mm のプラボールベースを対象とした場合の計測結果例を以下に示す。

#### (実験結果例 1 …埋設深度 50 mm)

図 3.2.1.16 に測定領域 (スキャンエリア) を示す。測定点数は 99 点(9×11 points)で、測定点間隔は約 50 mm である。なお、この時の砂表面から SLDV までの距離は 1.557 m であった。

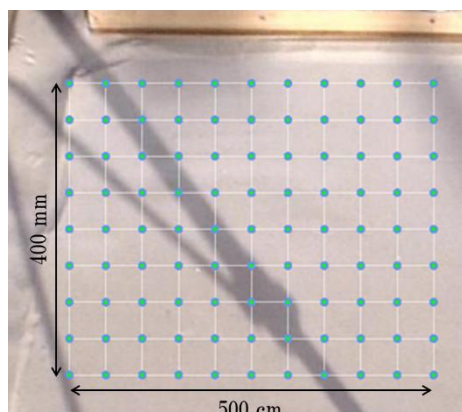


図 3.2.1.16 スキャンエリア

図 3.2.1.17 に埋設物上と思われる位置における振動速度スペクトルを示す。

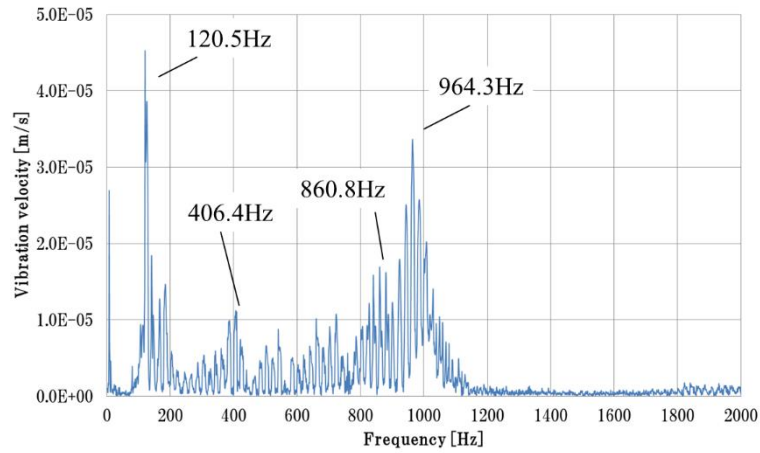


図 3.2.1.17 振動速度スペクトル (index 60)

図 3.2.1.18 に測定領域 (スキャンエリア) を示す。測定点数は 99 点(9×11 points)で、測定点間隔は約 50 mm である。なお、この時の砂表面から SLDV までの距離は 1.557 m であった。

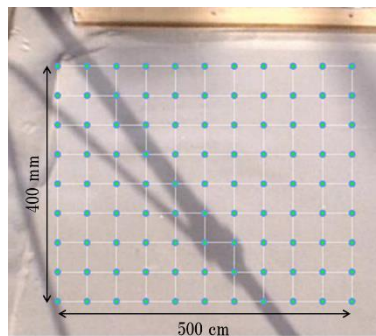


図 3.2.1.18 スキャンエリア

図 3.2.1.19 に埋設物上と思われる位置における振動速度スペクトルを示す。

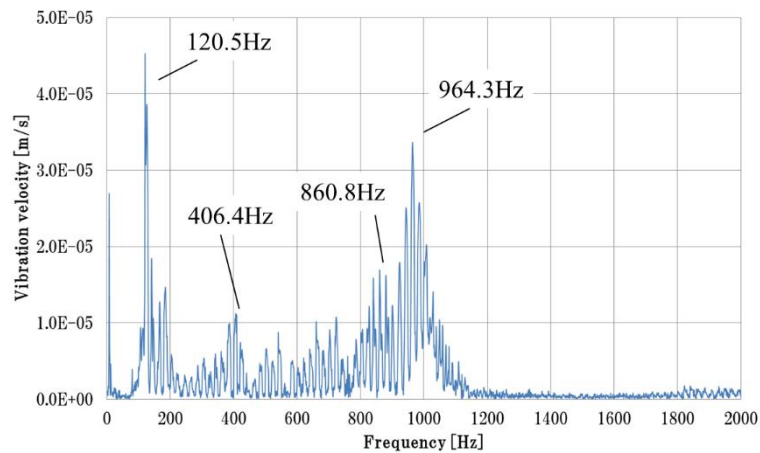


図 3.2.1.19 振動速度スペクトル (index 60)

図 3.2.1.19 より埋設物上では上記のように複数周波数の振動が発生していることがわかる。図中に示した各周波数の振動速度分布を図 3.2.1.20 に示す。

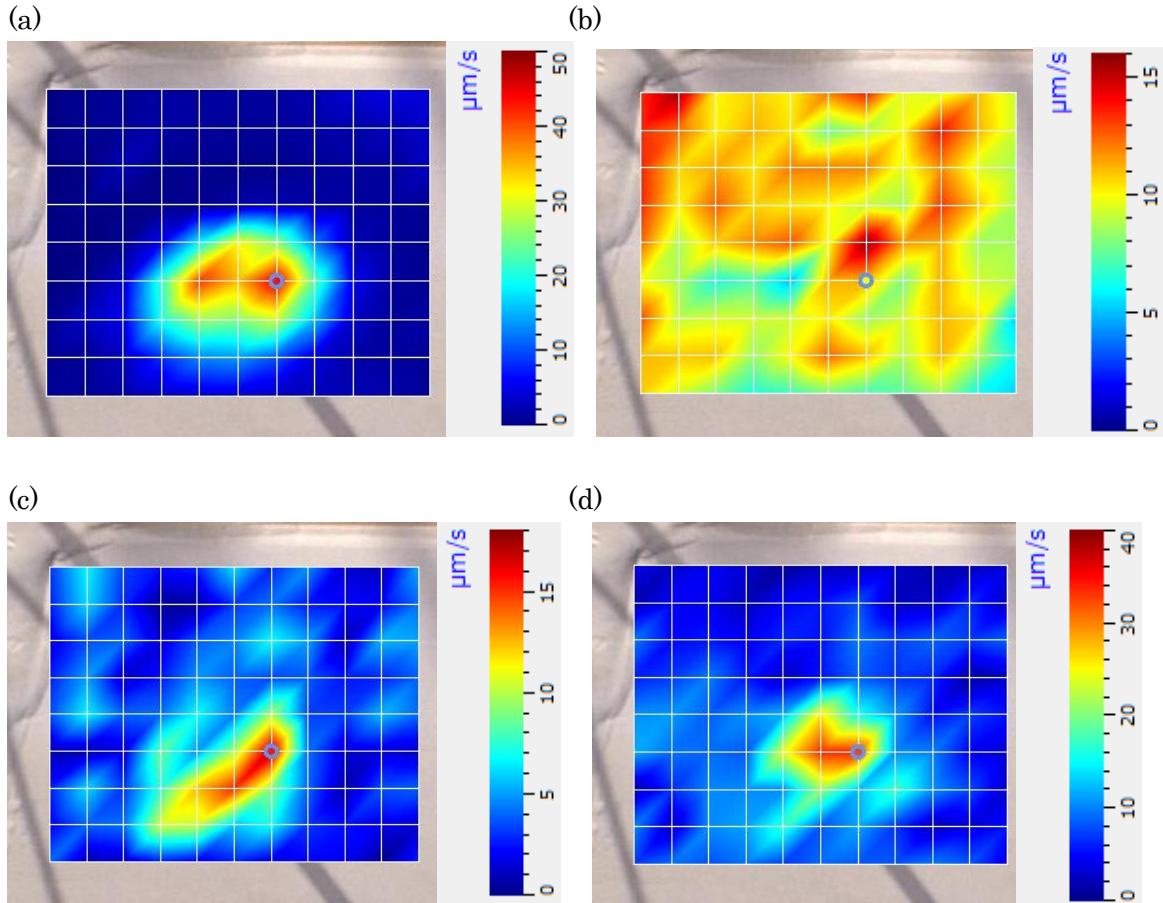


図 3.2.1.20 振動速度分布

(a)120.5 Hz、(b)406.4 Hz、(c)860.8 Hz、(d)964.3 Hz

図 3.2.1.20 より、120.5 Hz において埋設物の形状に近い振動速度分布が確認できる。406.4 Hz は使用したレーザドップラ振動計自体の共振であると思われる。860.8 Hz と 964.3 Hz は 120.5 Hz 程ではないが、周囲に比べて埋設物上が振動しやすい状況にある事がわかる。

**(実験結果例 2…埋設深度 100 mm)**

図 3.2.1.21 に測定領域（スキャンエリア）を示す。測定点数は 117 点(9×13 points)で、測定点間隔は約 45 mm である。この時の砂表面から SLDV までの距離は 1.732 m である。

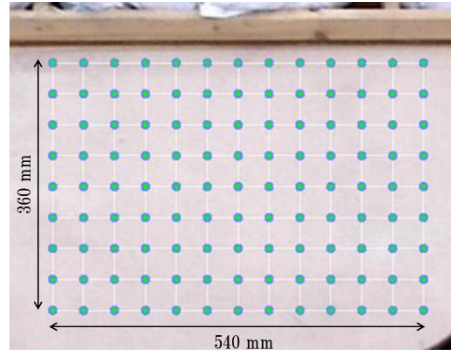


図 3.2.1.21 スキャンエリア

図 3.2.1.22 に埋設物上と思われる位置における振動速度スペクトルを示す。

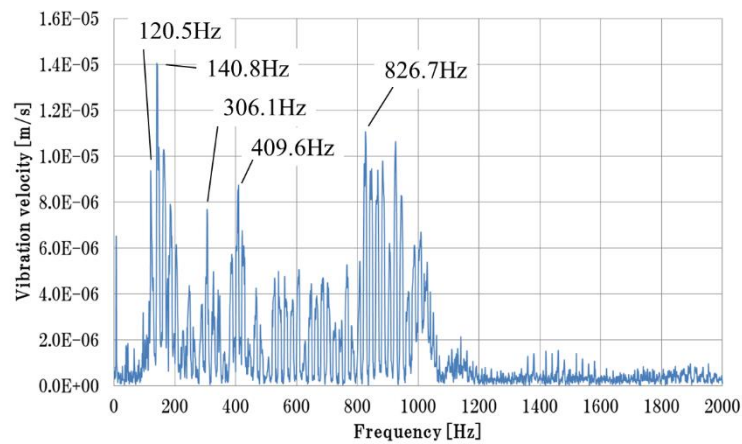


図 3.2.1.22 振動速度スペクトル (index 58)

図 3.2.1.22 より埋設物上では上記のように複数周波数の振動が発生していることがわかる。図中に示した各周波数の振動速度分布を図 3.2.1.23 に示す。



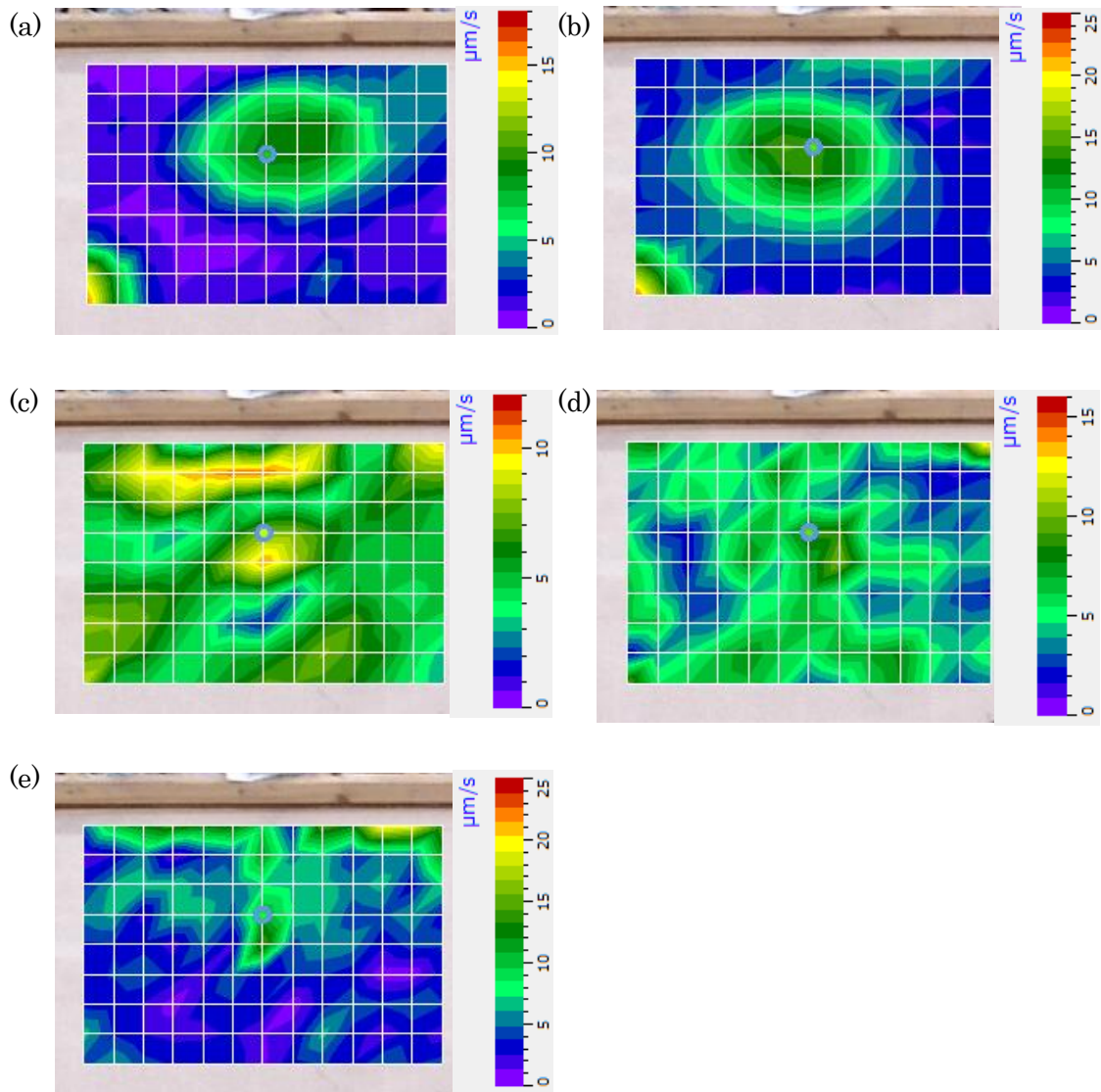


図 3.2.1.23 振動速度分布

(a)120.5 Hz、(b)140.8 Hz、(c)306.1 Hz、(d)409.6 Hz、(e)826.7 Hz

図 3.2.1.23 より、120.5 Hz と 140.8 Hz において埋設物形状に近い振動速度分布が確認できる。(a)(b)の左下に出ている反応は、隣接する埋設深度 5 cm の埋設物（プラポールベース）の振動である。306.1 Hz と 409.6 Hz と 826.7 Hz は上方に置かれている加圧用の板の振動と思われる影響があり、埋設物の振動と断定できない。上記の結果から埋設深度 50 mm と 100 mm では共振周波数に大きな変化が出ないことが確認できた。

(まとめ)

厚木の埋設物試験場（珪砂充填）にて、深度 50 mm および 100 mm の位置に埋設された直径約 300 mm のプラポールベースの検出を試みた。実験結果から深さを変えても基本検出周波数はほとんど変化しないということが明らかになった。

### 3.2.2 ローム土の場合

#### 3.2.2.1 陸上装備研究所 管理土槽室における基礎実験

##### (実験セットアップ)

2020年7月および8月に、相模原市にある陸上装備研究所内の管理土槽室において非接触音響探査法を用いた埋設物探査実験を実施した。天井のある屋内での実験であったために、UAVは使用せず、固定台の上に乗せた音源とLDVを用いて、近距離計測(1 m, 3 m)および遠距離計測(10 m, 20 m, 30 m)を行った。図 3.2.2.1、図 3.2.2.2 にそれぞれ近距離計測、および遠距離計測の実験セットアップ図を示す。加振用音源であるフラットスピーカ(FPS2030M3P1R, FPS INC.)はイレクターパイプ(Yazaki Kako Corp.)およびメタルジョイント(Yazaki Kako Corp.)により組まれた台の上に配置し計測対象面に対して音響放射を行い、スキャニングレーザドップラ振動計であるPSV-500 Xtra (Polytec Japan Corp.)は計測距離に合わせて位置を調整しながら、計測対象面の振動計測を行った。なお、音波による加振力を調整変化させるために、図 3.2.2.1(a),(b)および図 3.2.2.2(a),(b)に示すように適宜音源の高さを変更して実験している(約 1.2m～約 0.8m 程度)。

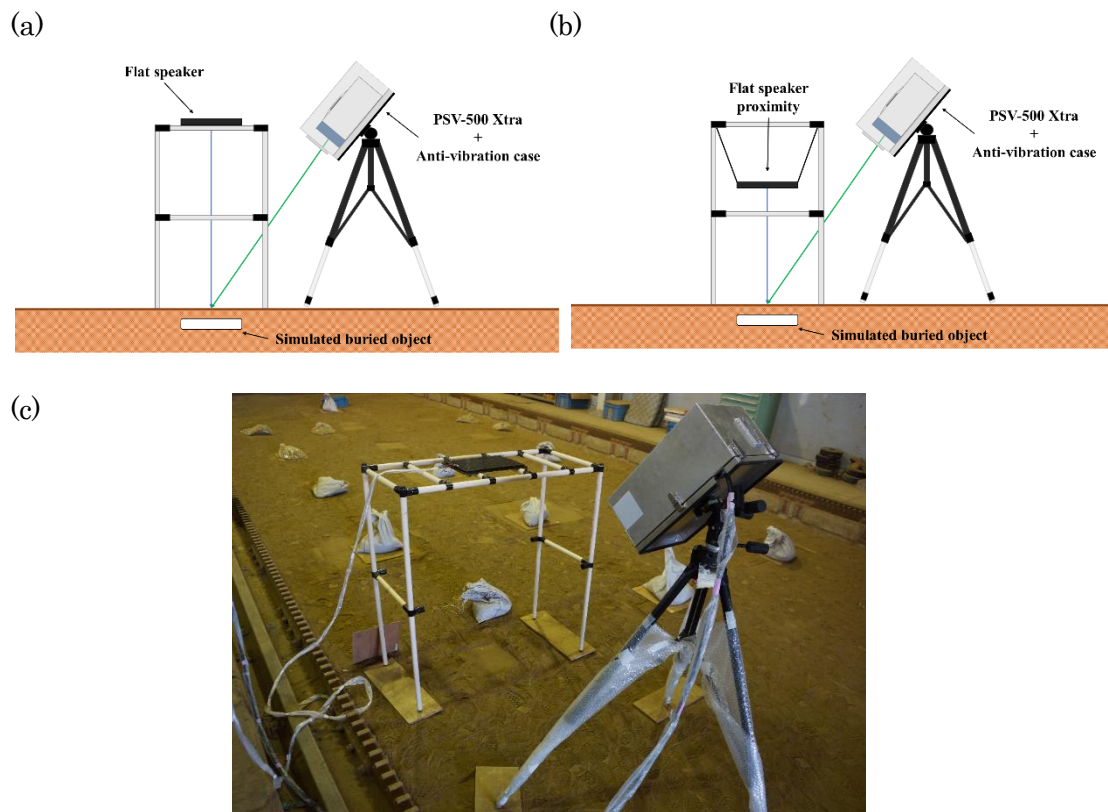


図 3.2.2.1 近距離用実験セットアップ (a) 実験セットアップ図(音源高さ約 1.2m 時)、  
(b) 実験セットアップ図(音源高さ約 0.8m 時)、(c) 実験風景

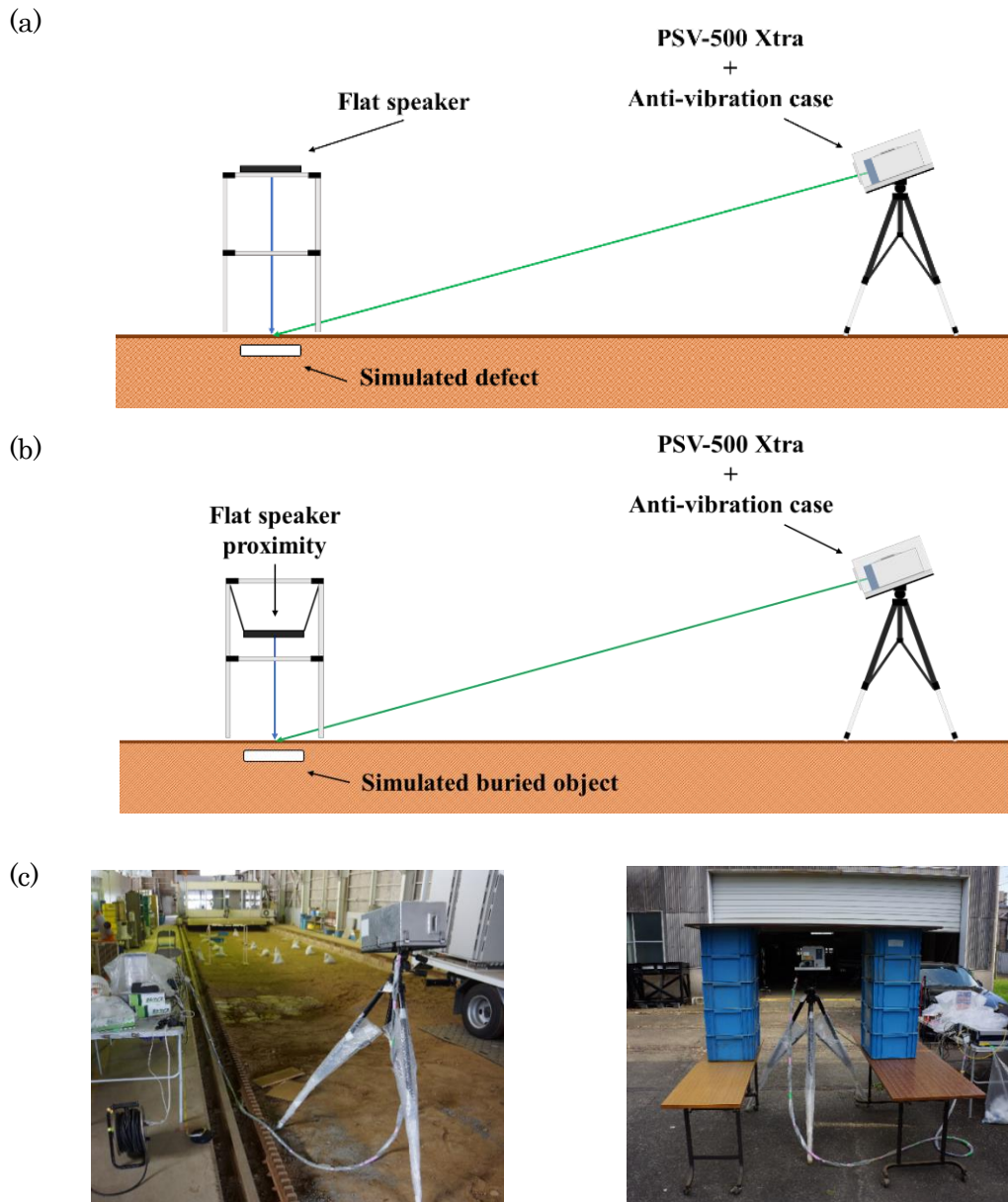


図 3.2.2.2 遠距離用実験セットアップ (a) 実験セットアップ図(音源高さ約 1.2m 時)、  
(b) 実験セットアップ図(音源高さ約 0.8m 時)、(c) 実験風景

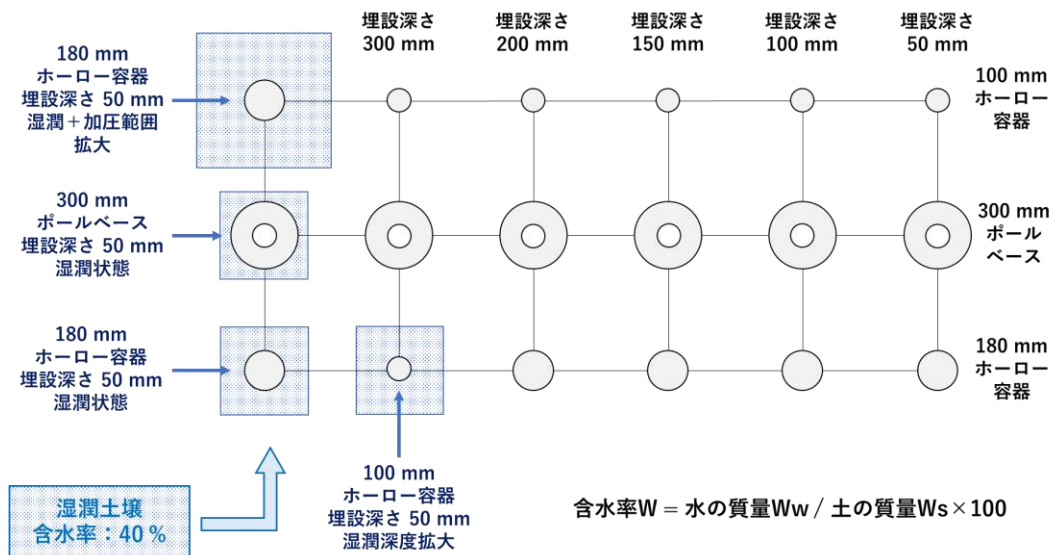
#### (模擬埋設物について)

模擬埋設物としては、直径 300 mm のポールベース (PE 製、中央部に直径約 60mm の穴が開いたドーナツ形状、高さ約 60mm) および直径 180 mm (高さ約 60mm) と直径 100 mm (高さ約 40 mm) のホーロー容器 (ホーロー鋼板製+ポリエチレンの蓋付) の 3 種類を準備した。すべて中空の状態で使用した。なお、ホーロー容器の場合は、蓋の部分を下になるようにし、かつ蓋部が外れてしまわないように養生テープで容器本体に固定した。

## (模擬埋設物の設置状況)

今回の非接触音響探査法実験における計測対象である模擬埋設物の埋設位置を図 3.2.2.3 に示す。図 3.2.2.3(b)は、図 3.2.2.3(a)の右側から撮影したものである。模擬埋設物の埋設深度は 50、100、150、200、300 mm の 5 パターン存在しているが、今回の実験では時間の関係上埋設深度 50 mm および 100 mm の模擬埋設物を対象に計測を実施している。また、今回は佐藤工業による土の締固め試験結果より含水率を約 40%に高めた土壌に模擬埋設物が埋設されていた場合における、計測結果への影響も同様に検証した(他は約 18~20%程度の含水率で、かなり乾燥している状態)。さらに、含水率を高めた土壌の範囲を変化させた影響についても検証を行った。

(a)



(b)

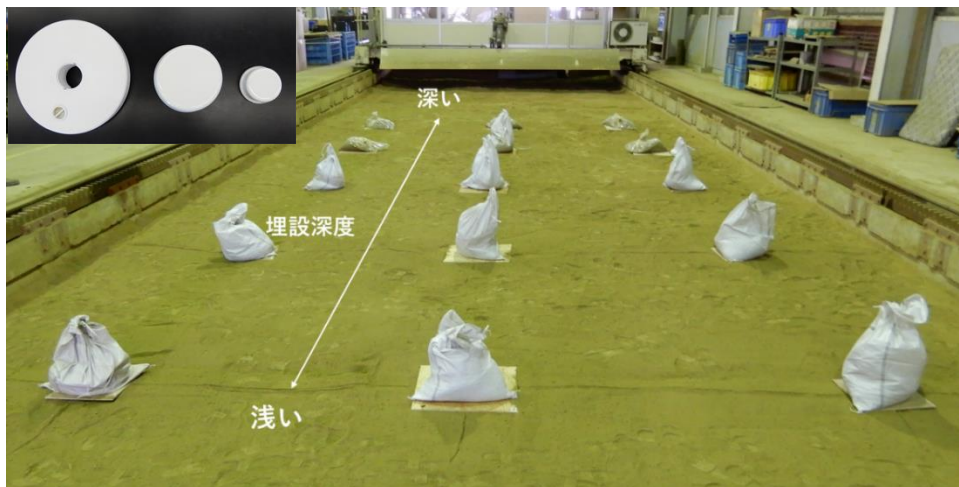


図 3.2.2.3 模擬埋設物設置状況 (a) 8月実験時の埋設物配置、(b) 初期設置時写真

模擬埋設物の埋設状態図を図 3.2.2.4 に示す。前述したように今回は土壌中の含水率(通常時 20%)および湿潤範囲を変えて模擬埋設物を埋設した。埋設方法は、模擬埋設物の上面が指定した埋設深度になるように穴を掘り、模擬埋設物を配置した後に土を被せ、土壌表面に木板を置き加圧を行っている。加圧に使用した木板は約 300~450 mm 角程度の大きさで(直径 100 mm の埋設物には小さな板を、それより大きな埋設物にはなるべく大きな板を使用)、木板の上に約 5 kg 程度の重さに調整した土嚢袋を置くことにより加圧を行った。また、含水率が異なるものは、模擬埋設物の上から被せる土を含水率が 40%程度になるように調整された土に変更することで、土壌中の水分量を変化させている。土壌中の水分量を変化させた場合の計測対象の写真を図 3.2.2.5 に示す。含水率を変化させた理由は、陸装研のローム土の場合、含水率 20%程度しかなく、表面がさらさらの砂のような状態になっており、音波照射により表面粒子が簡単に振動してしまうことが判明したためである。そのため、最適な締固め状態になるように、佐藤工業側にこのローム土の締固め特性を調べてもらった。その結果として、実験現場で調整しやすい値として 40%程度の含水率に調整することとしたのである(このローム土の締固め特性図については付録 A 参照)。

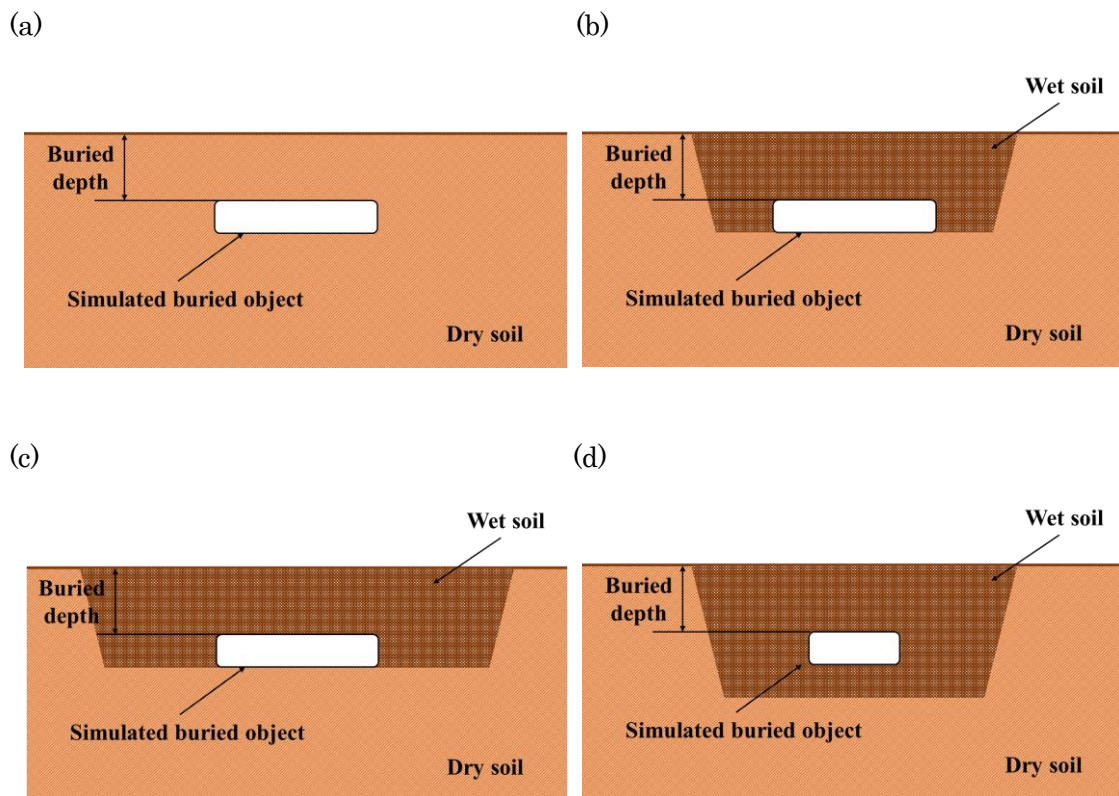


図 3.2.2.4 模擬埋設物の埋設状態図

(a)通常時：含水率約 20% (b)湿潤状態：含水率約 40%

(c) 湿潤+加圧範囲拡大：含水率約 40% (d) 湿潤深度拡大：含水率約 40%



図 3.2.2.5 湿潤土壌(含水率約 40%)の計測対象例

**(実験結果・・・計測対象別の近距離計測 比較結果)**

計測対象別の近距離計測比較結果を図 3.2.2.6 に示す。埋設物は直径 300 mm のプラポールベース、直径 180 mm ホーロー容器および直径 100 mm のホーロー容器である。LDV による計測距離は約 1 m で埋設深さは約 50 mm である（土壌の含水率 20%、映像化周波数範囲 50-200 Hz）。図より、乾燥した土壌でも、直径 180 mm 以上の埋設物が明確に検出できることが分かる。プラポールベースは中央穴部の振動の違いも見取ることができる。また、使用した波形は周波数範囲 50-200 Hz のマルチトーンバースト波である。なお、図の右側には実験条件（覚書）、実験日、実験番号、加水有無、音源と地表面までの距離、SLDV と地表面までの距離が参考のために記載されている。

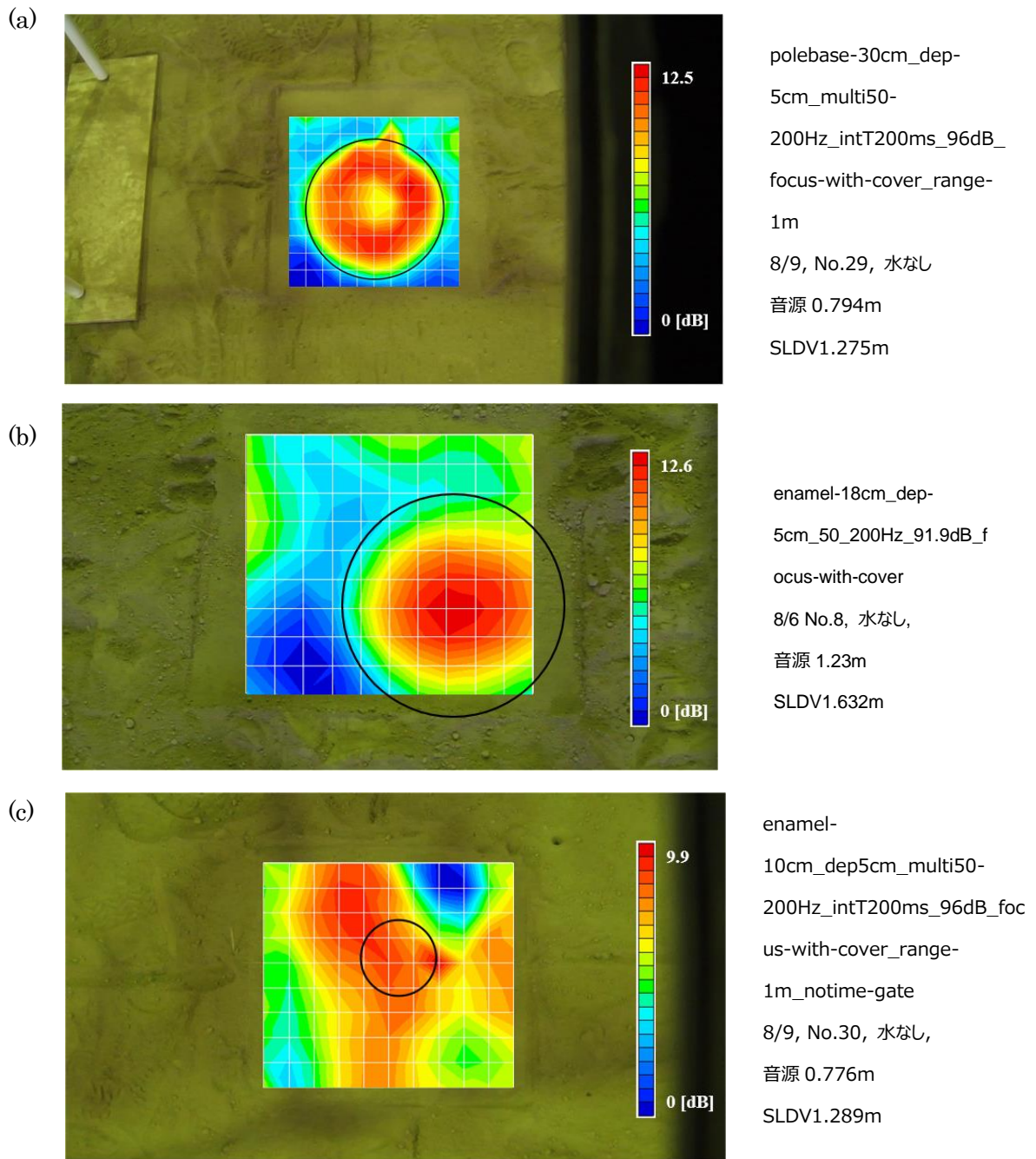


図 3.2.2.6 振動エネルギー比による映像化例 (a) 300 mm プラポールベース, (b)180 mm ホーロー容器, (c) 100 mm ホーロー容器、黒円は埋設物の位置と大きさを示す。埋設深さは 50 mm。

## (実験結果・・・埋設深さ別比較結果)

深さ 50 mm では検出可能であった直径 300 mm のプラポールベースの場合の埋設深さ 100 mm の場合の結果例を図 3.2.2.7 に示す (計測距離は 1 m)。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のマルチトーンバースト波を使用した。

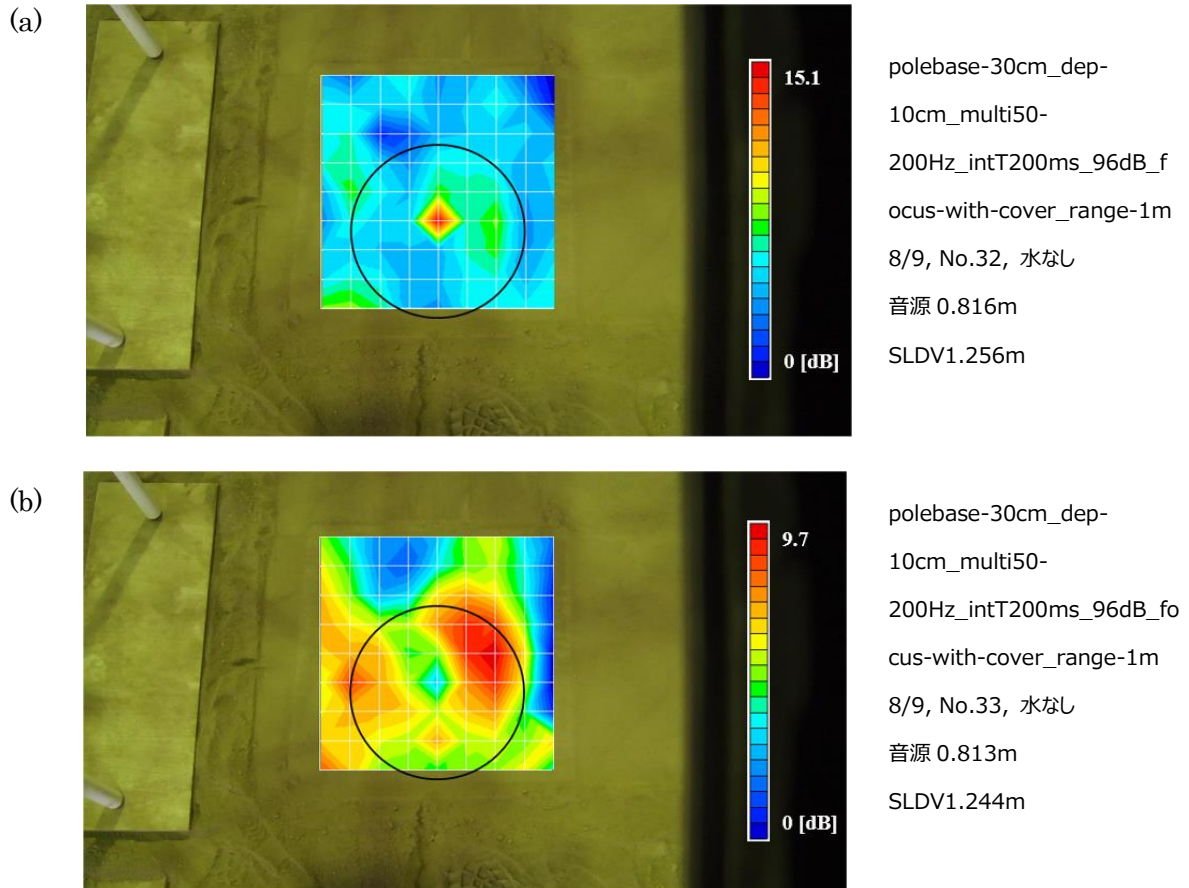


図 3.2.2.7 300 mm プラポールベースの振動エネルギー比による映像化例

(a) 深さ 100 mm、映像化周波数範囲 50-200 Hz、

(b) 深さ 100 mm、映像化周波数範囲 50-120 Hz、

黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

図より、乾燥した土壌 (ローム土) では、100 mm の深さになると、土壌表面自体に加振エネルギーが吸収されてしまうために埋設物自体の検出が難しくなることがわかる。ただし、図 3.2.2.7(b)に示すように対象物の揺れやすい周波数近辺 (ここでは 50~120 Hz) のみを映像化周波数とすることにより、埋設物自体の振動を捉えることができることがわかる。



同じく深さ 50 mm では検出可能であった直径 180 mm のホーロー容器の場合の埋設深さ別の比較結果を図 3.2.2.8 に示す。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のマルチトーンバースト波を使用した。

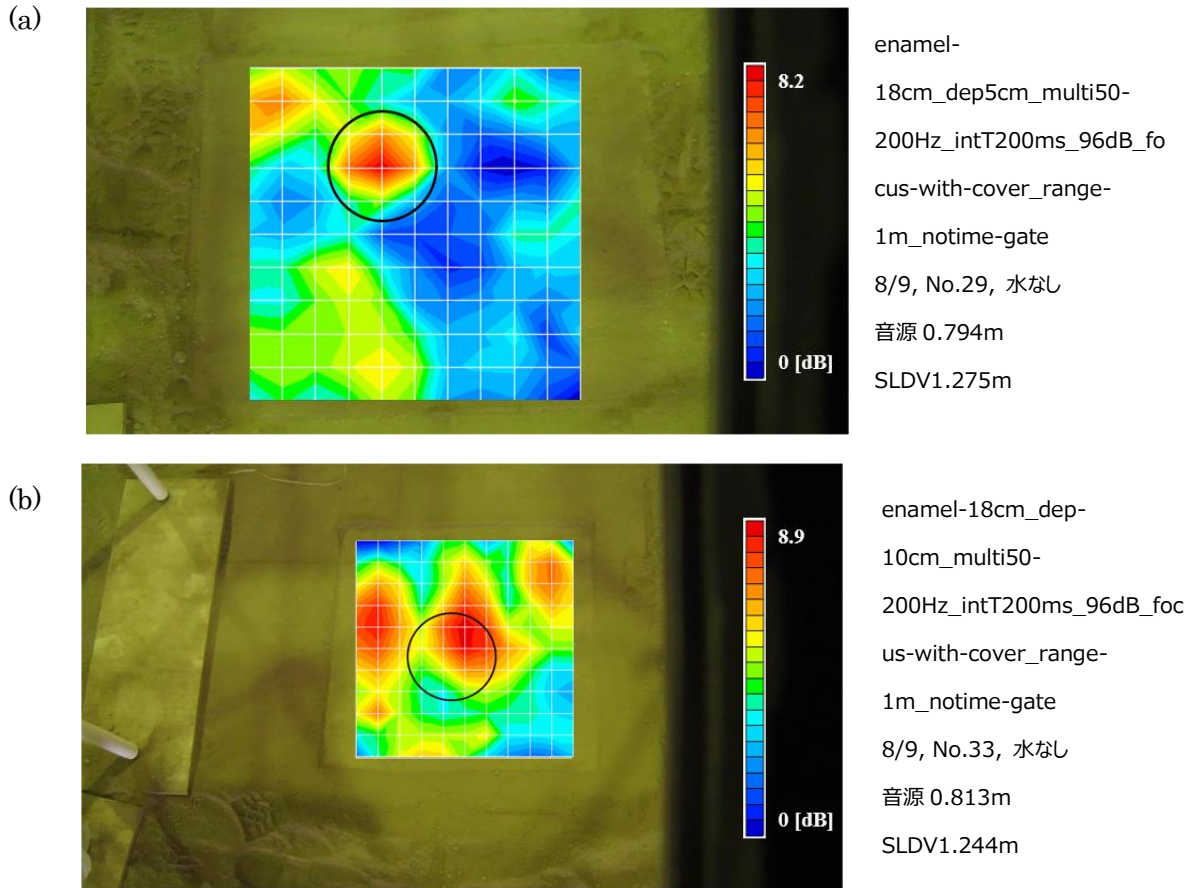


図 3.2.2.8 直径 180 mm のホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例

- (a) 深さ 50 mm、映像化周波数範囲 50-200 Hz、  
(b) 深さ 100 mm、映像化周波数範囲 50-200 Hz、  
黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

直径 180 mm のホーロー容器の場合、埋設深さ 50 mm であれば検出可能であるが、埋設深さ 100 mm になると、埋設物の真上であっても、周囲の土壌表面振動と同じ程度の振動となるため、検出が困難になることがわかる。

#### (実験結果・・・加水有無の比較\_直径 300 mm ポールベース)

図 3.2.2.9 に埋設深さ 50 mm の直径 300 mm ポールベースの場合の、加水有無による比較を示す。図より、埋設物上の土の状態に依存して検出される振動分布が変化するものの、検出可能であることが確認できる。また含水率 40%の場合には、見た目はあまり変化しないが、周波数範囲を絞ることで、振動エネルギー比にも若干向上がみて取れる。なお、使用波

形は周波数範囲 50-200 Hz および 50-300 Hz のマルチトーンバースト波である。

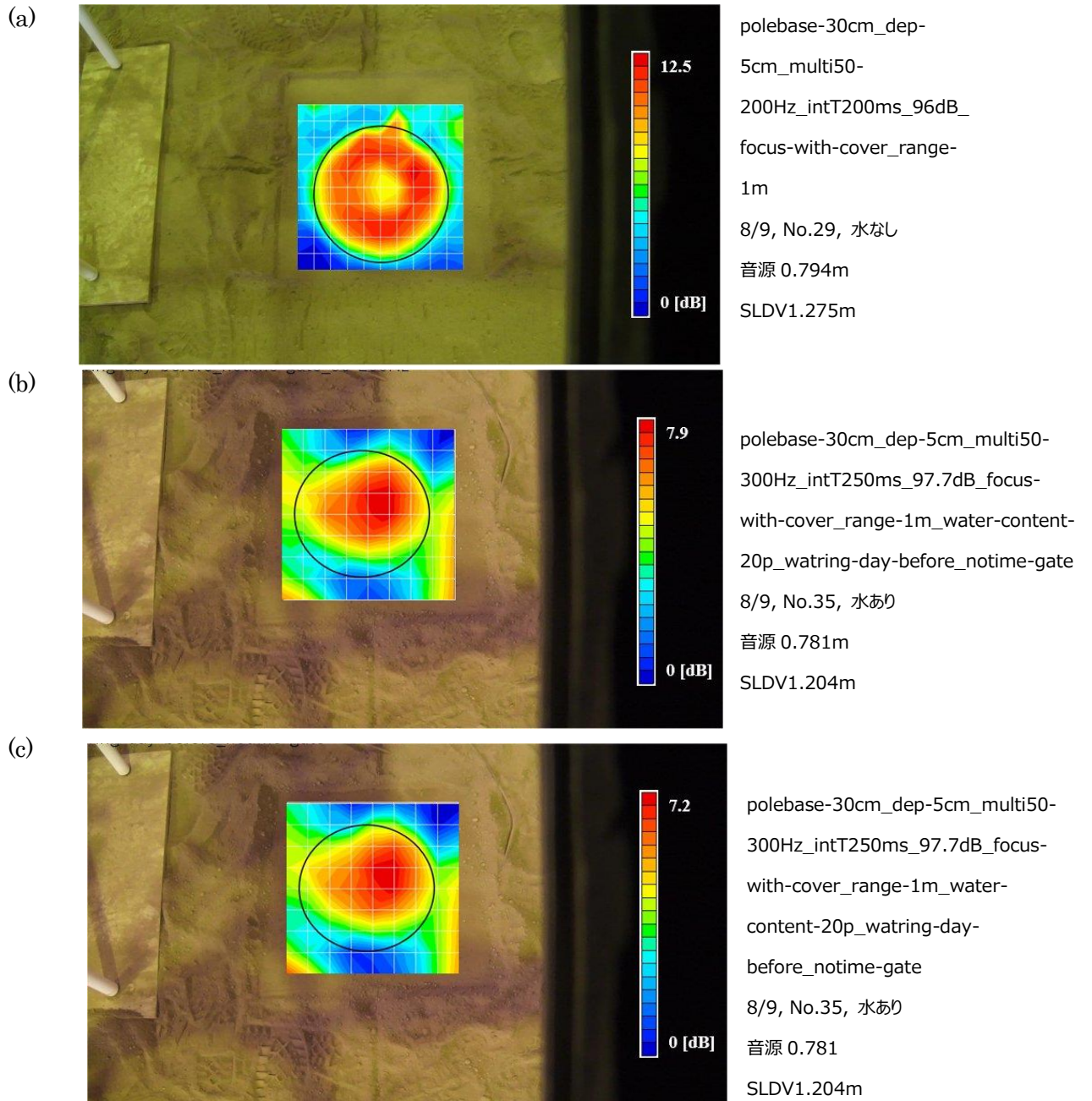


図 3.2.2.9 加水有無の比較、300 mm ボールベースの場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 含水率 20% 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(b) 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(c) 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-300Hz、黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

(実験結果・・・加水有無の比較\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.10 に埋設深さ 50 mm 直径 180 mm ホーロー容器の場合の、加水有無による比較を示す。図より、直径 180 mm ホーロー容器の場合には、含水率 40%に上げることで、地表面にある細かい土粒子の振動が抑えられて、明確な検出ができることがわかる。図 3.2.2.10(b)では 1 点だけ強い振動エネルギー比を示す箇所があるが、これは地表面下にある小石が反応したことが考えられる。(c)はその点を除いた結果である。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 および 50-300Hz のマルチトーンバースト波である。

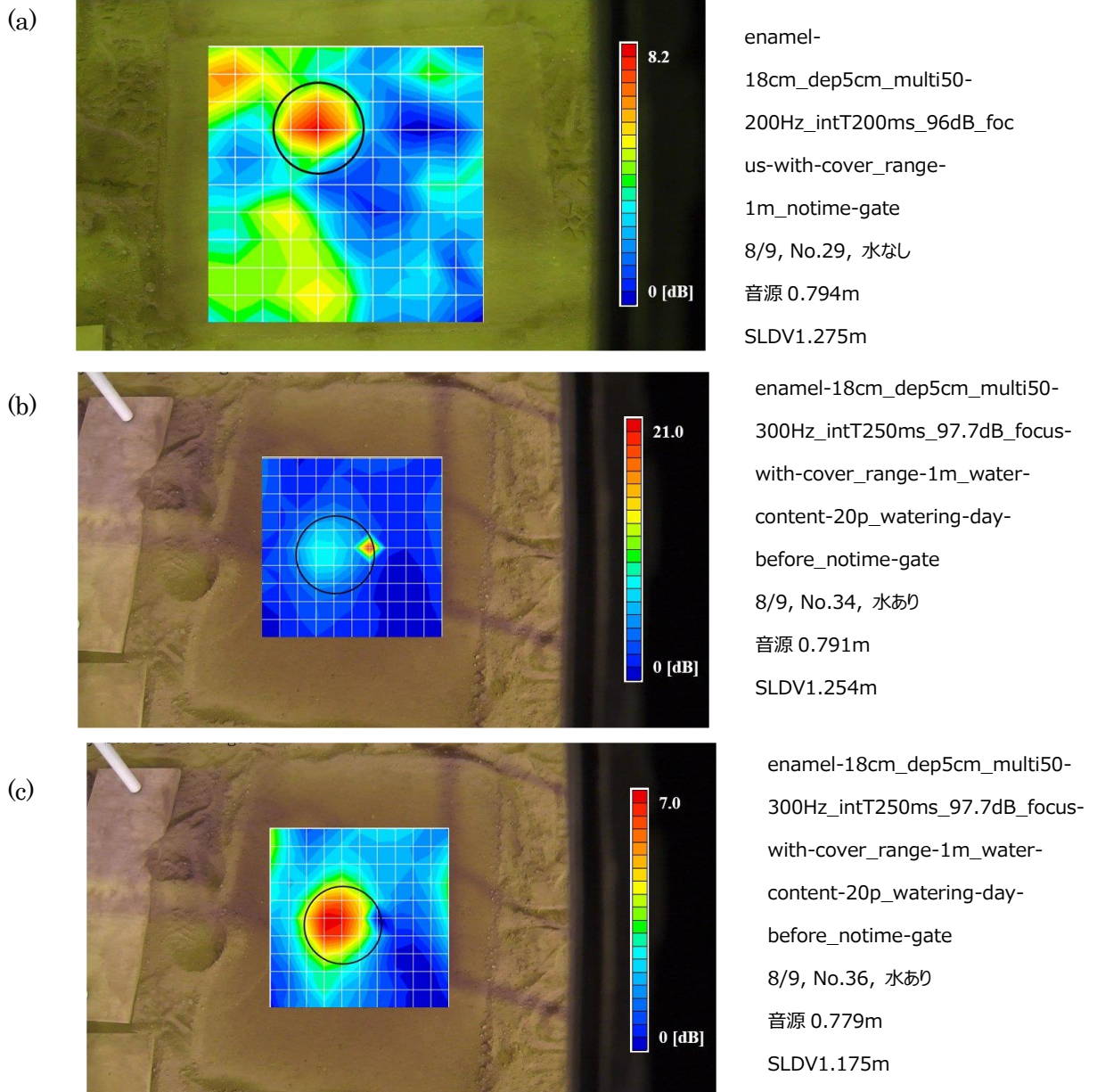


図 3.2.2.10 加水有無の比較、180 mm ホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例、(a) 含水率 20% 周波数範囲 50-200Hz, (b) 含水率 40% 周波数範囲 50-300Hz, (c) 含水率 40% 周波数範囲 50-200Hz, 黒円は埋設位置と大きさを示す。

### (実験結果・・・加水有無の比較\_直径 100 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.11 に埋設深さ 50 mm の直径 100 mm ホーロー容器の場合の、加水有無による比較を示す。図より、直径 100 mm ホーロー容器の場合にも、含水率 40%に上げることで、地表面にある細かい土粒子の振動が抑えられて、明確な検出ができることがわかる。なお、この容器の場合には、容器の大きさが小さかったこともあり、容器の下部も含めて包み込むような形で含水率の高い箇所を作成した上で実験している。(c)は、計測結果におけるノイズを削除するために、周波数範囲を絞って映像化を行った。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz および 50-300 Hz のマルチトーンバースト波である。

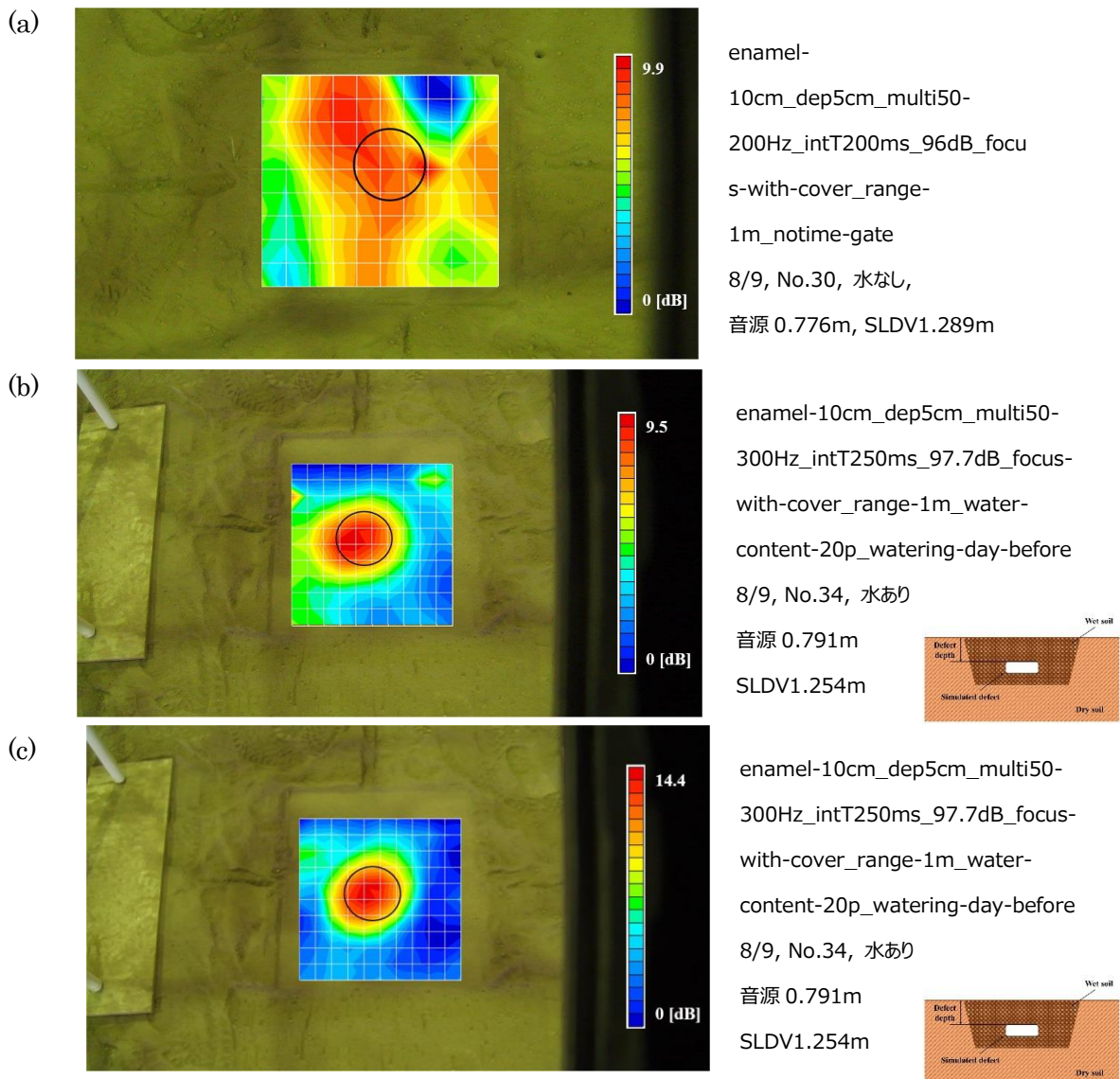


図 3.2.2.11 加水有無の比較、100 mm ホーロー容器の場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 含水率 20% 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(b) 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-300 Hz、(c) 含水率 40% 映像化周波数範囲 220-350 Hz、黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

(実験結果・・・加水日時の比較\_直径 300 mm プラポールベース)

図 3.2.2.12 に埋設深さ 50 mm の直径 300 mm プラポールベースの場合の、加水日時による比較を示す。図より、加水当日に比べて、翌日になると、埋設物の反応が明確でなくなることが分かる。この理由は、周囲の土が非常に乾燥しているため、一時的に含水率を上げた箇所を作成しても、周囲土壌に水分が拡散してしまい、均一な含水状態が長くは保てないことが要因として考えられる。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。

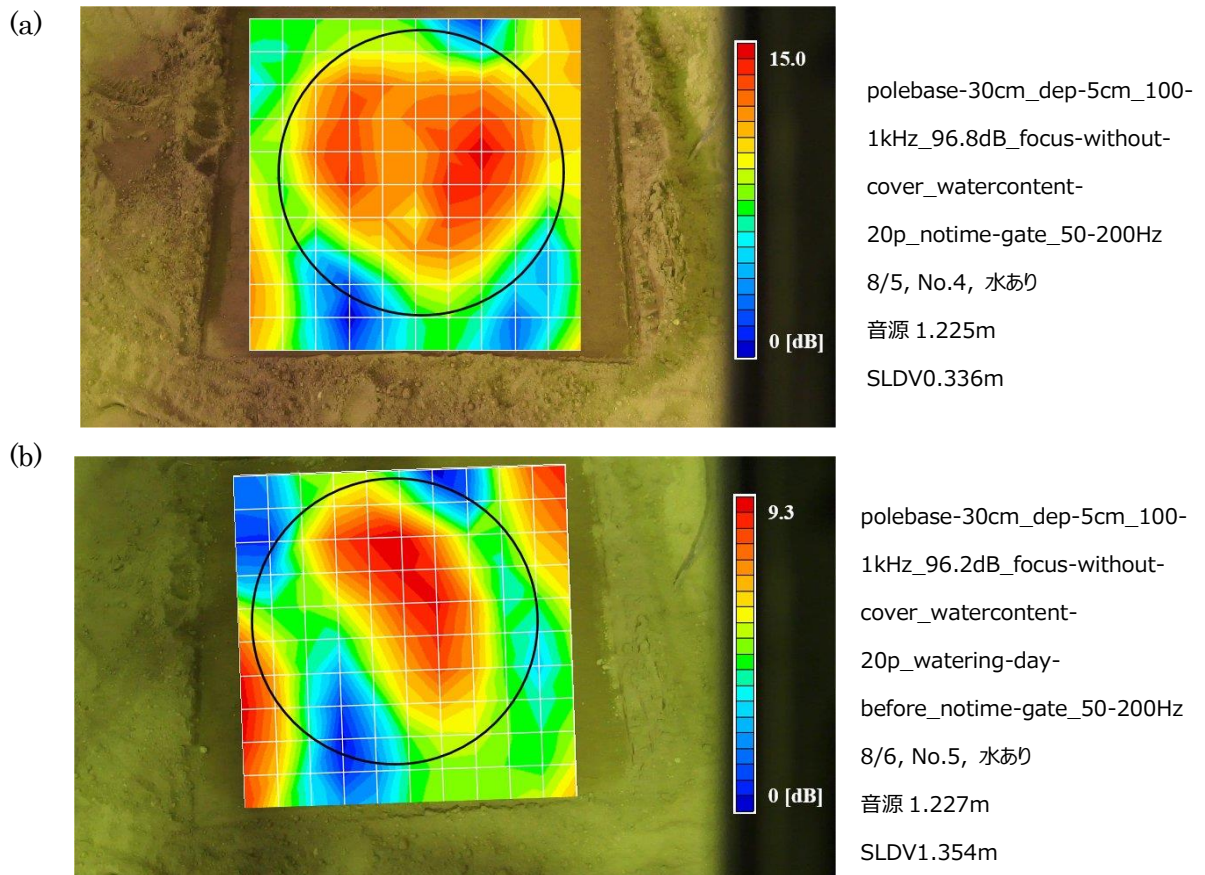


図 3.2.2.12 加水日時の比較、300 mm ポールベースの場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 加水当日 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 加水翌日 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

## (実験結果・・・加水日時の比較\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.13 に埋設深さ 50 mm の直径 180 mm ホーロー容器の場合の加水日時による比較を示す。図より、加水当日に比べて、翌日になると埋設物の反応が明確でなくなることが分かる。この理由は、含水率差による周囲土壌への水分拡散が原因と思われる。参考のために(c)に加水領域を広げた場合の映像化例を示す。時間の関係で翌日計測ができていないが、広い領域で含水率を一定にできれば、安定した計測ができる可能性があると思われる。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。

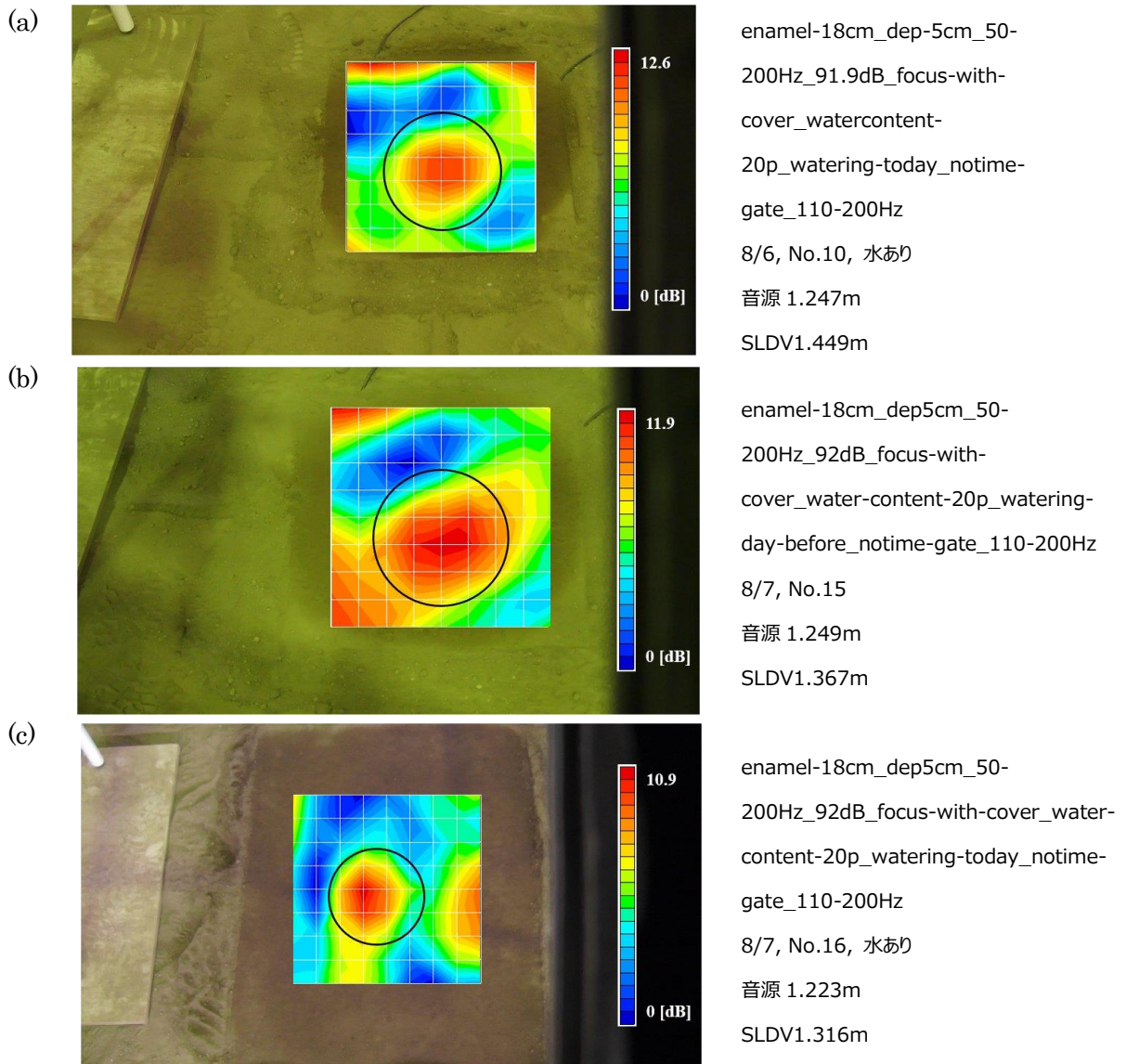


図 3.2.2.13 加水日時の比較、180 mm ホーロー容器の場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 加水当日 含水率 40% 映像化周波数範囲 110-200 Hz, (b) 加水翌日 含水率 40% 映像化周波数範囲 110-200 Hz, (c) 加水当日 含水率 40% 映像化周波数範囲 110-200 Hz、加水領域拡大

(実験結果・・・計測距離を変化させた場合 1\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.14 に埋設深さ 50 mm の直径 180 mm ホーロー容器の場合の、計測距離を 1, 3, 10 m と変化させた場合の比較を示す。距離が離れると LDV のレーザ光が地表面に入射する角度が小さくなっていくことになる。そのため、計測する向きが、音源の加振方向と異なることになり、検出感度が低下していくことが予想される。図より、3 m 程度の離隔ではほとんど検出感度に影響はなく、10 m 程度になると低下するものの検出自体は問題なく行えていることがわかる。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。なお、音源の高さは約 0.8 m である。

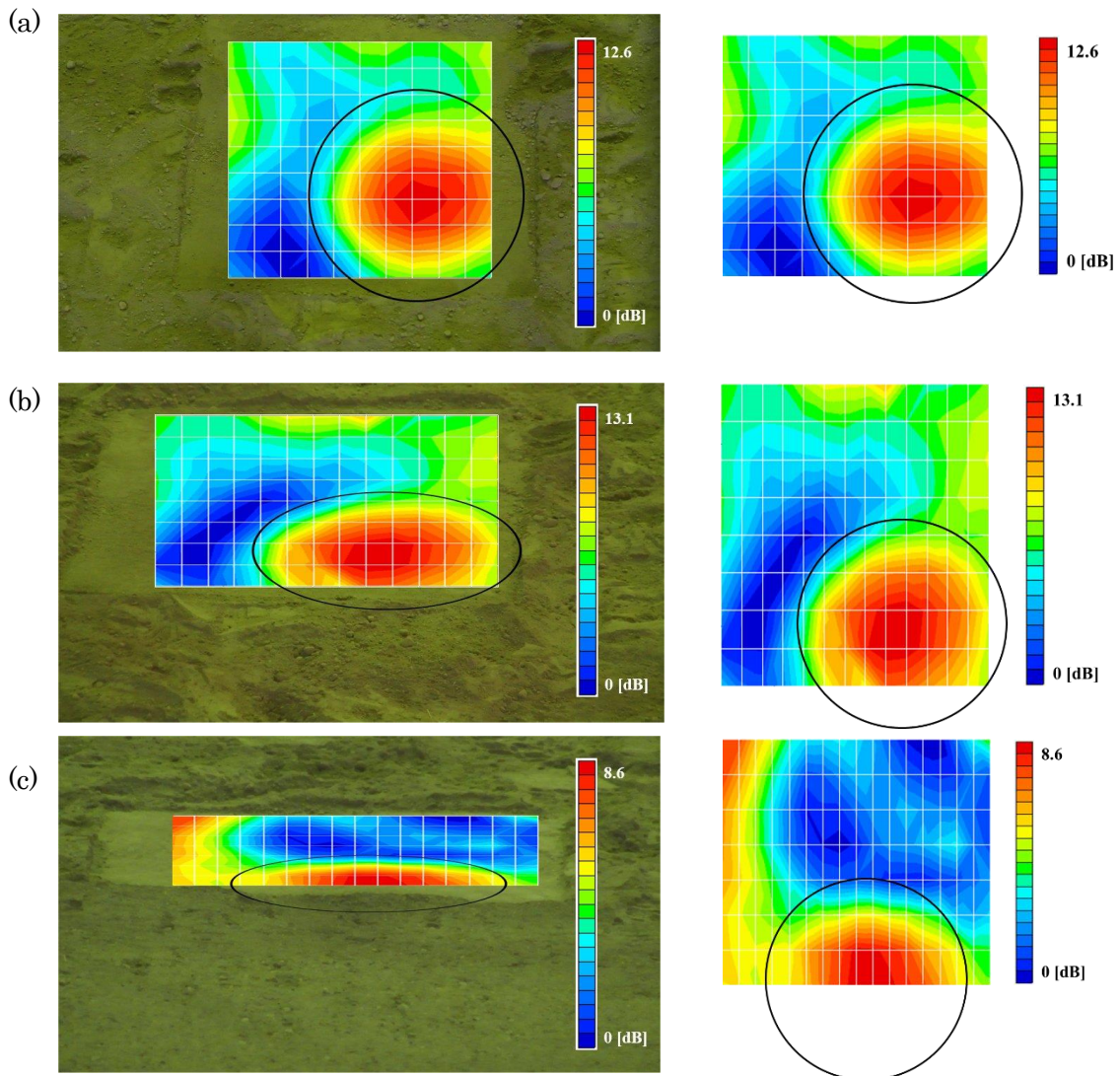


図 3.2.2.14 計測距離変化時の比較 1、180 mm ホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例、(a) 離隔 1 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(b) 離隔 3 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(c) 離隔 10 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz、黒円は埋設物の位置と大きさを示す (埋設深さ 50 mm、含水率 20%)。

(実験結果・・・計測距離を変化させた場合 2\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.15 に埋設深さ 50 mm の直径 180 mm ホーロー容器の場合の、計測距離を 10, 20, 30 m と変化させた場合の比較を示す。図より、距離が離れることにより、LDV のレーザー光が地表面に入射する角度が小さくなっていくため、音源の加振方向と異なることになり、検出感度が低下していく様子が見て取れる。ただし、LDV は通常の三脚を使用して計測しているために高さは 2 m 程度でしかない。大型の車両の上部に乗せて、高さを稼ぐことができれば、レーザー光の入射角を大きくすることができるため、遠距離からの計測時の映像が改善できる可能性がある。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。なお、音源の高さは約 0.8 m である。

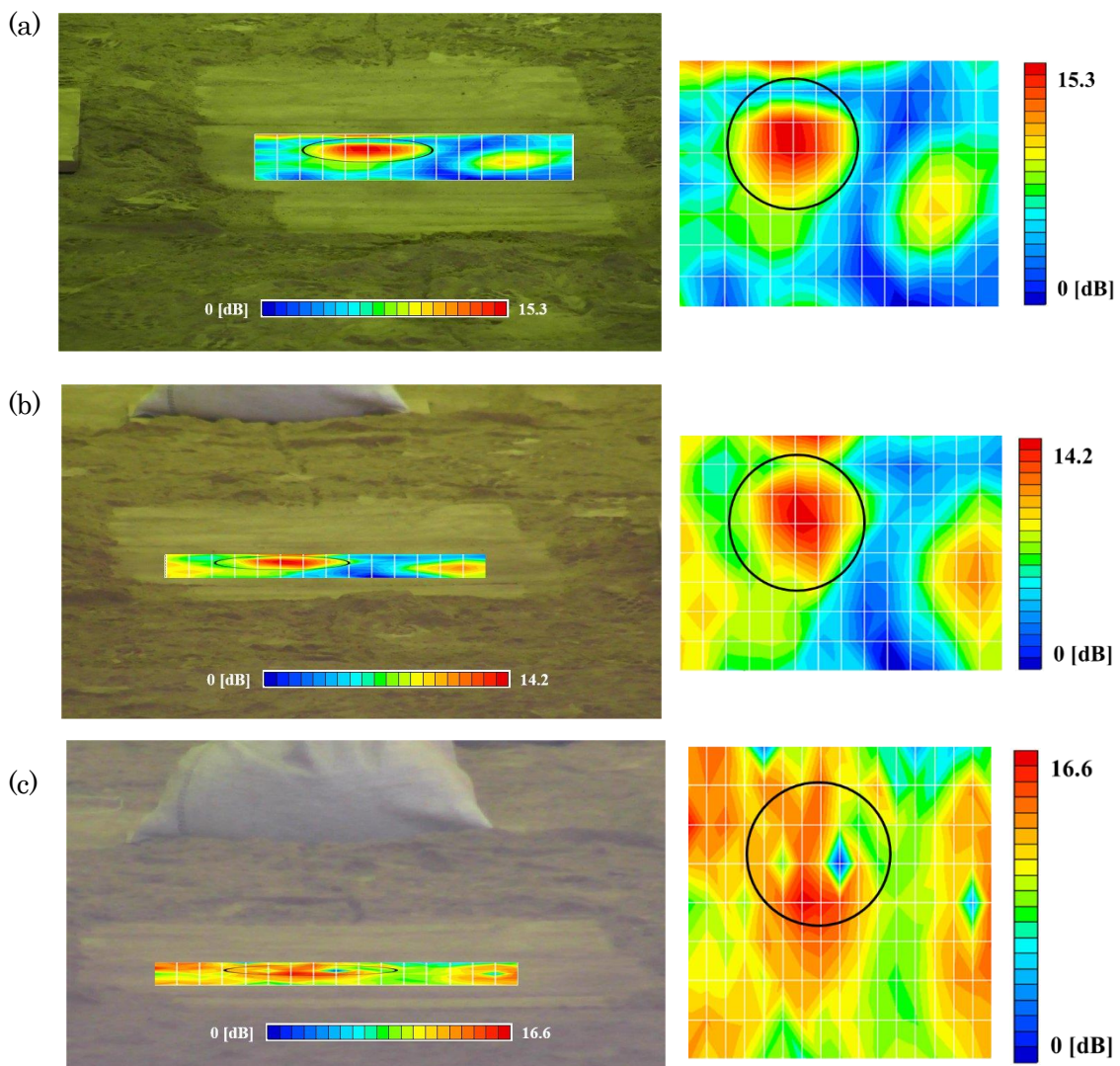


図 3.2.2.15 計測距離変化時の比較 2、180 mm ホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例、(a) 離隔 10 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 離隔 20 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (c) 離隔 30 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す (埋設深さ 50 mm、含水率 20%)。



(実験結果・・・計測距離を変化させた場合\_直径 300 mm プラポールベース)

図 3.2.2.16 に埋設深さ 50 mm の直径 300 mm プラポールベースの場合の、計測距離を 10, 20, 30 m と変化させた場合の比較を示す。図より、距離が離れることにより、LDV のレーザ光が地表面に入射する角度が小さくなっていくため、音源の加振方向と異なることになり、検出感度が低下していく様子が見て取れる。ただし、どの距離でも埋設物の形状を反映して、ドーナツ状の円中央孔の振動が円周部より、小さくなっていることがわかる。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。なお、音源の高さは約 0.8 m である。

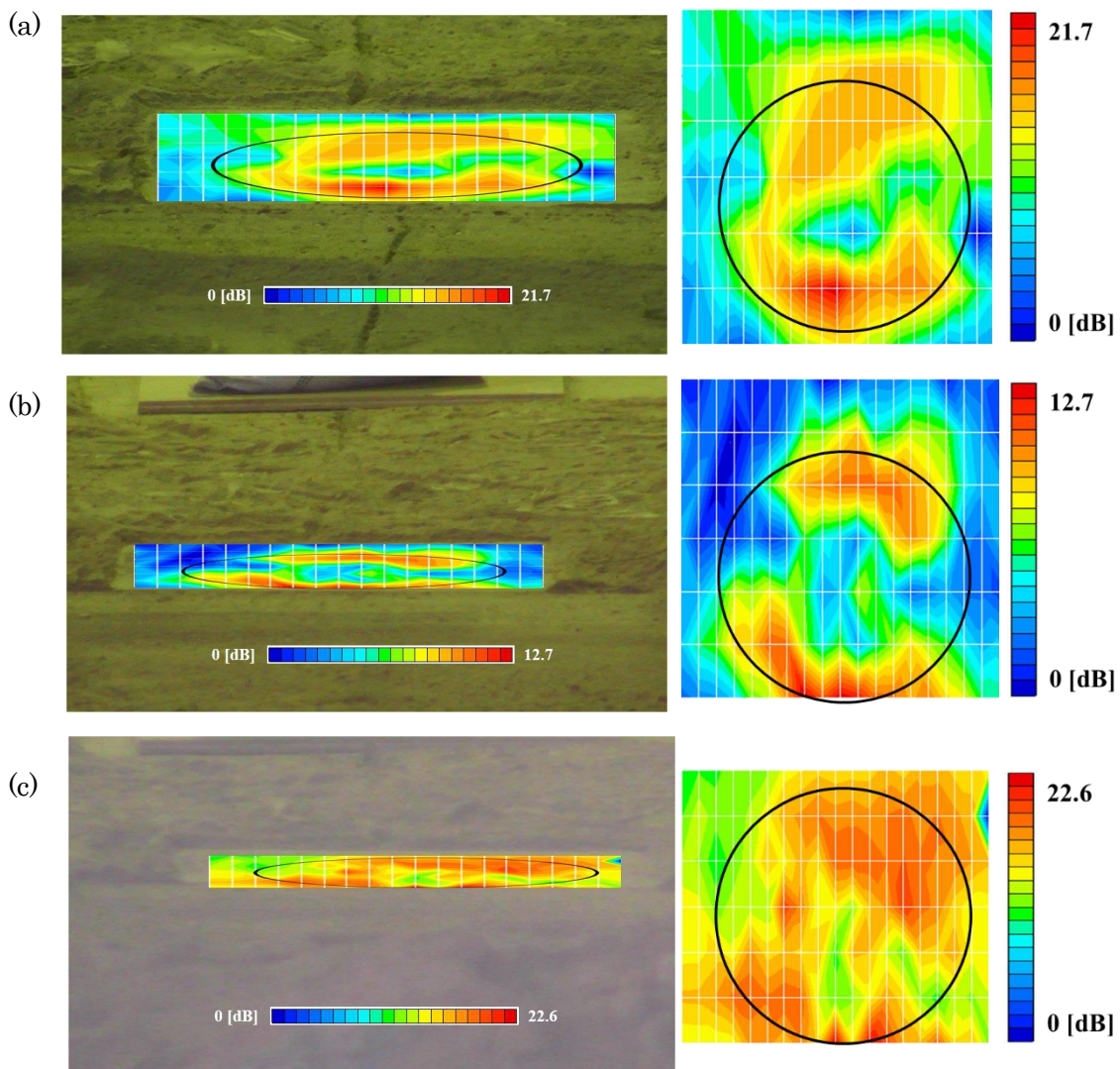


図 3.2.2.16 計測距離変化時の比較、300 mm プラポールベースの振動エネルギー比による映像化例、(a) 離隔 10 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 離隔 20 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (c) 離隔 30 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す (埋設深さ 50 mm、含水率 20%)。

## (まとめ)

陸上装設備研究所・土槽管理室内の乾燥したローム土内に埋設した埋設物に対して、音波照射加振を用いた非接触音響探査法を用いた探査を実施した。乾燥した状態のローム土（含水率約 20%）では、土表面にある粒子が音波照射により揺れやすい状態であったが、そのような状態であっても深さ 50 mm では直径 180~300 mm の埋設物の映像化が可能であることを確認した。深さ 100 mm では、直径 300 mm の埋設物は振動しやすい周波数を送波すれば映像化が可能であったが、直径 180 mm では土表面の振動と埋設物真上の振動が同程度であったために、検出は困難であった。これは土の締固め具合が影響していると思われるため、含水率を 40%に上げた場合の計測を実施した。土表面の粒子の振動を抑えることができたため、含水率を 40%に上げた場合には直径 100 mm の埋設物でも明瞭な検出が行えた。ただし、周囲が乾燥しているために、翌日になると含水率の分布が変化してしまい検出映像が変化することも明らかになった。さらに計測距離を変えた場合は、三脚に乗せた LDV の高さが 2 m 程度であっても、離隔 20 m 程度までは問題なく映像化が可能であった。離隔 30 m になると、LDV によるレーザ光が地表面へ入射する際の角度が小さくなりすぎるために映像結果が劣化したが、これはあくまでも入射角度の問題であるため、車両上部に機材を設置するなどして、高さを稼ぐことにより、改善される可能性がある。また、この距離を変化させる実験は、準備の都合上、すべて含水率 20%のまま実施されている。したがって、含水率を上げて、もう少し締固まった状態の土であれば、さらに S/N 比が向上する可能性が高いと思われる。



(実験時参考写真 A : 遠距離計測時 (離隔 10 m) 時の機材配置例、2019 年 8 月 6 日)

### 3.2.2.2 つくばの埋設物試験場 2 における基礎実験 1 (直径 300 mmポールベース) (実験セットアップ)

相模原からつくばに移送された関東ローム土中に埋設された直径 300 mm のポールベースにおいて、埋設深度を変化させた影響について検討を行った (2020 年 10 月 13 日実施)。実験風景写真を図 3.2.2.17、ポールベースの埋設位置イメージ図を Fig.3.2.2.18 に示す。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。図中における括弧内の数値は、計測後に調べた実測値である。実験では計測時間短縮のため、一方向からの計測であったため対象の埋設物により計測距離に差異が存在する。実験時のセットアップ図を図 3.2.2.19 および図 3.2.2.20 に示す。加振用音源である平面音源はイレクターパイプにより組まれた台の上に固定し、振動計測用のレーザヘッドは供試体の傍らに配置し斜めからの計測が行われた。加振用波形としては、周波数範囲 50-152 Hz のシングルトーンバースト波を使用した。使用波形および波形設定を図 3.2.2.21 に示す。埋設深度別の計測時の設定について表 3.2.2.1 に示す。

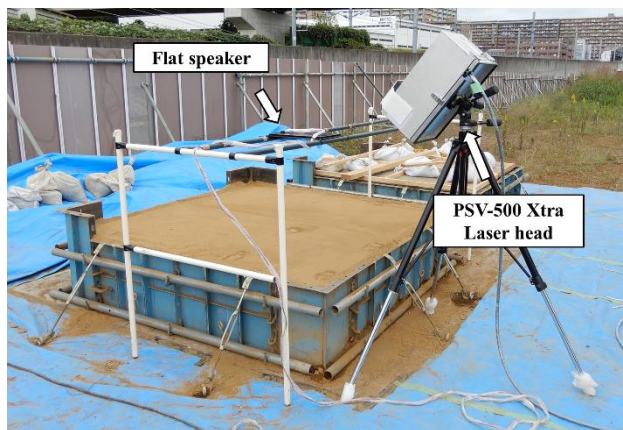


図 3.2.2.17 実験風景写真

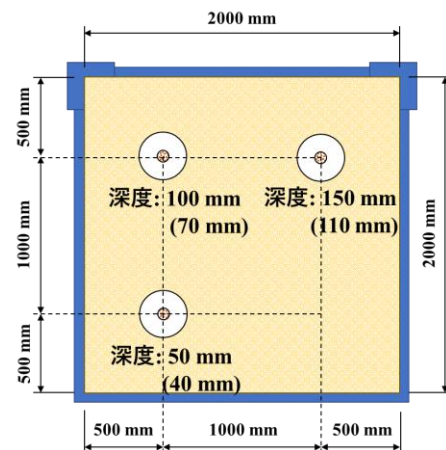


図 3.2.2.18 埋設位置イメージ図

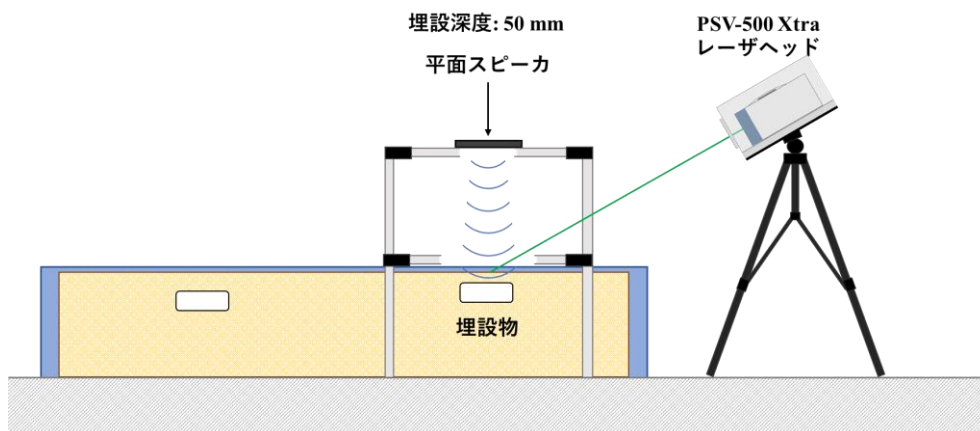


図 3.2.2.19 実験セットアップ図：埋設深度 50 mm

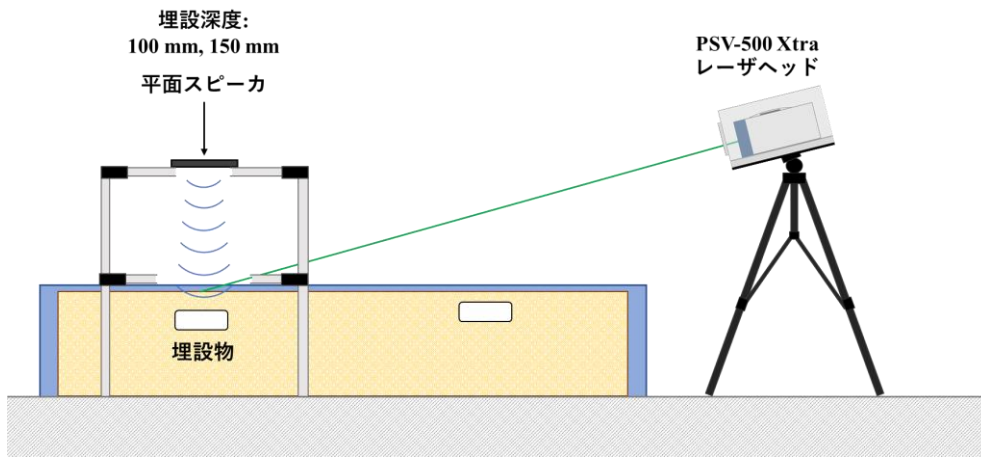
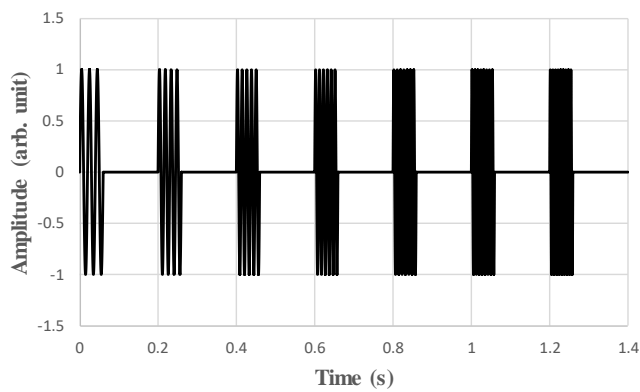


図 3.2.2.20 実験セットアップ図：埋設深度 100 mm, 150 mm



周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.2.2.21 使用波形：シングルトーンバースト波 50-152 Hz

表 3.2.2.1 計測設定

シングルトーンバースト波: 50-152 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm
レーザー距離 [m]	1.15	2.02	1.93
音源距離 [m]	0.68	0.67	0.67
加算平均回数	5	5	5
最大音圧 [dB]	99.0	99.0	99.0
計測ポイント数	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

計測対象ごとの計測範囲図を図 3.2.2.22～図 3.2.2.24 に示す。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。計測範囲としては 400 mm～550 mm 程度に設定されており、埋設物である直径 300 mm のポールベースが十分に計測範囲に入る大きさになっている。また、計測密度に関しても 40 mm～70 mm 程度の間隔になっており、埋設物を検出するために必要な間隔になっている。

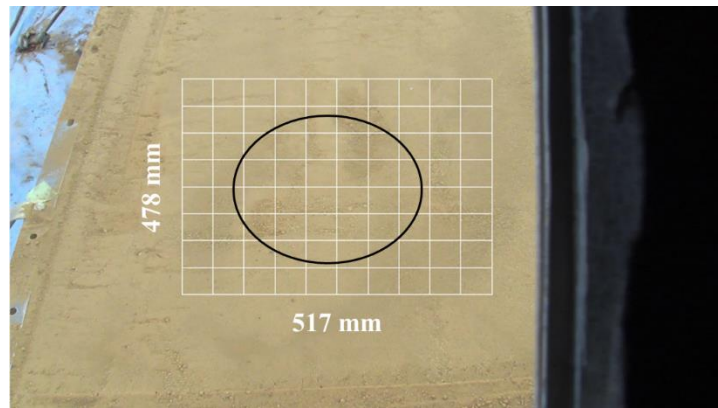


図 3.2.2.22 計測範囲図：埋設深度 50 mm

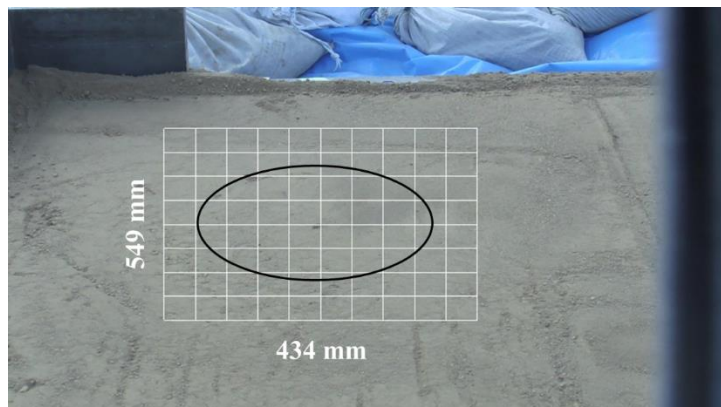


図 3.2.2.23 計測範囲図：埋設深度 100 mm

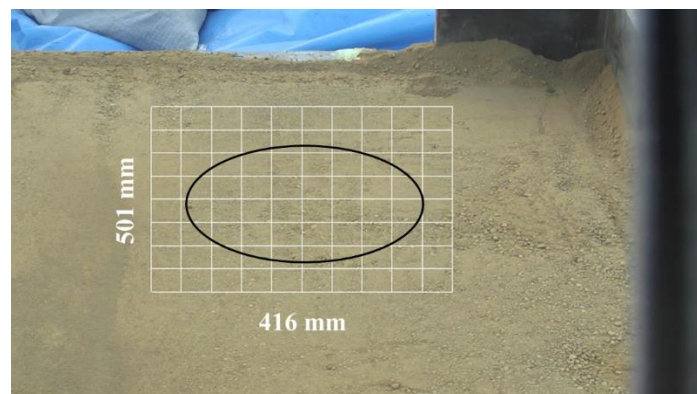


図 3.2.2.24 計測範囲図：埋設深度 150 mm

**(振動エネルギー比分布)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.2.25～図 3.2.2.27 に示す。解析時には周波数フィルター(50-152 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm および 100 mm の結果では、埋設物の反応が明確に検出されている。しかし、埋設深度 150 mm は全体的に振動エネルギーが高く埋設物を判別するのが困難な状態である。これは、比をとるときの基準点が著しく低い事が影響している部分もあるが、埋設物上と周囲の点で余り差異が見られないことから、単純に振動エネルギー比を使用しただけでは埋設物の判断が難しいことを示している。

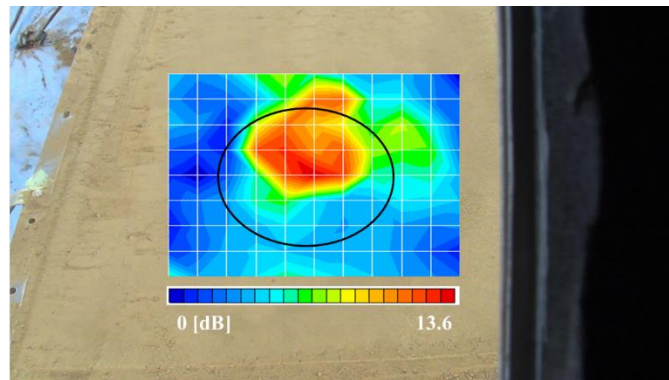


図 3.2.2.25 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 50 mm

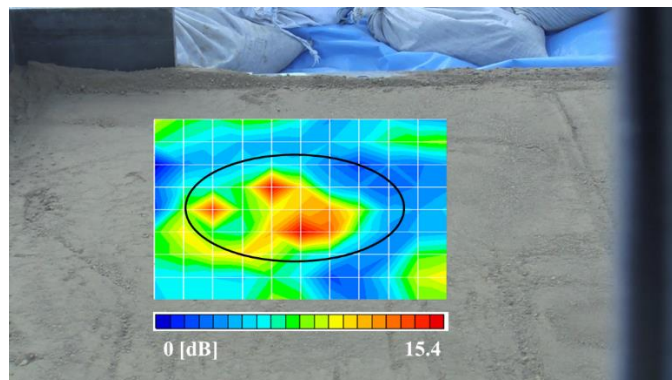


図 3.2.2.26 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 100 mm

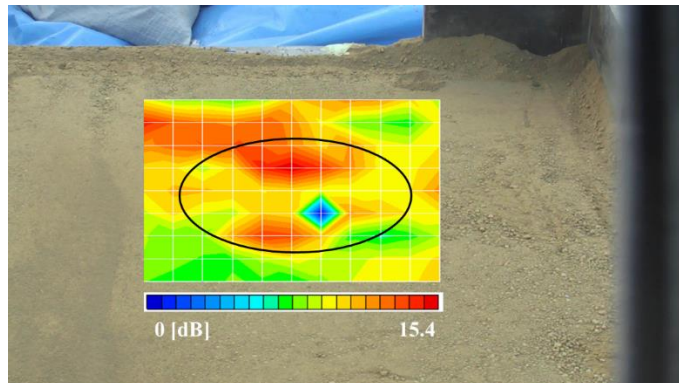


図 3.2.2.27 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 150 mm

### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物上の代表点における生データの振動速度波形を図 3.2.2.28 に、振動速度スペクトルを図 3.2.2.29 に示す。振動速度波形においては、150 mm の結果で振幅の低下が見られるが、100 mm の結果で一部振幅の増加が存在しており、埋設深度との関連性は確認できない。振動速度スペクトルを比較した場合では、100 Hz 辺りに存在する卓越した反応において、埋設深度の増加に反比例する形で振動速度が低下する傾向が得られた。ただし、埋設深度 100 mm の結果では他とは異なり大きな反応が二つ検出された。これは、埋設されているポールベースの形状が影響していると考えられる。

次に計測点(99 ポイント)における全点平均の振動速度波形を図 3.2.2.30、振動速度スペクトルを図 3.2.2.31 に示す。全点平均においても、埋設深度の違いによる振動速度の明確な差異は判別が困難である。特に、振動速度スペクトルでは代表点と比較して細かい反応が増加しており、単純な比較が難しくなっている。

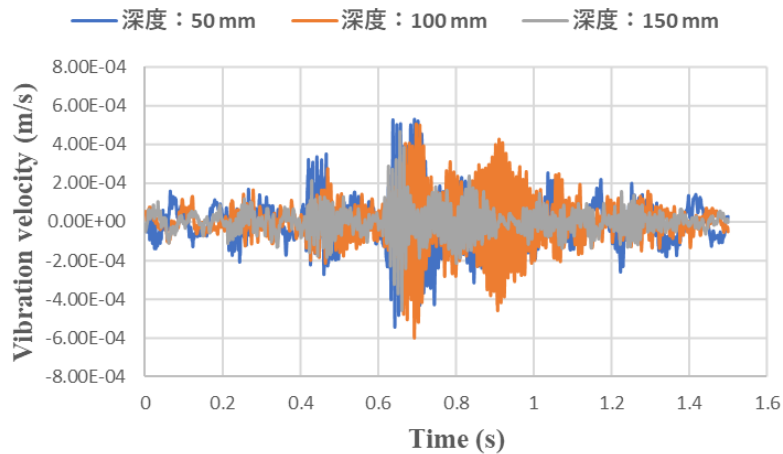


図 3.2.2.28 振動速度波形：代表点、300 mm ポールベース

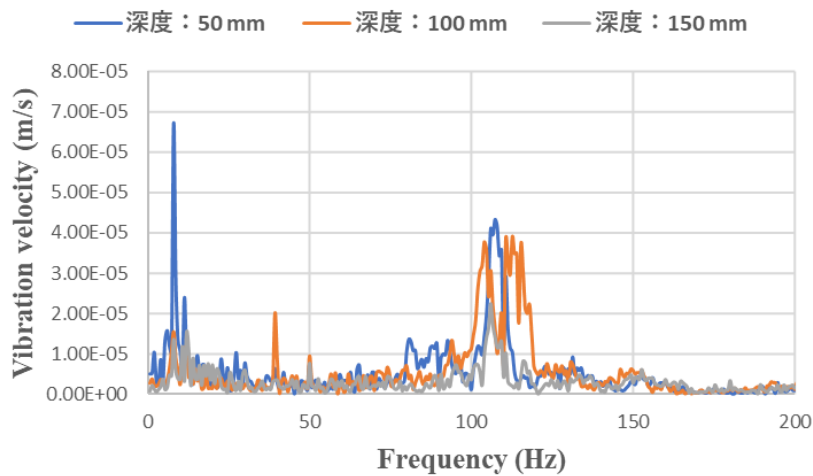


図 3.2.2.29 振動速度スペクトル：代表点、300 mm ポールベース

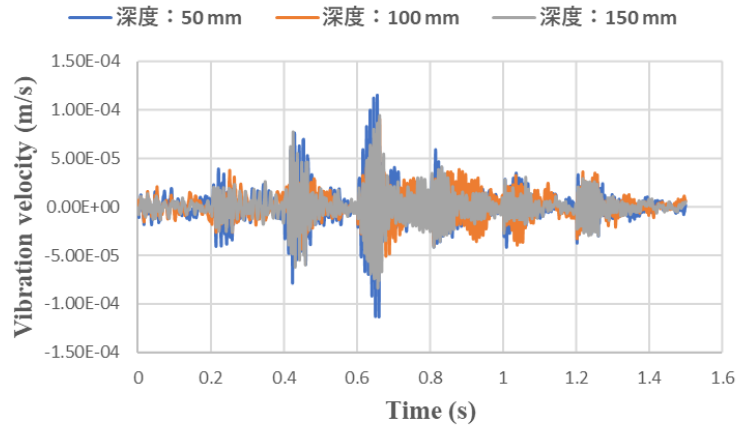


図 3.2.2.30 振動速度波形：全点平均、300 mm ポールベース

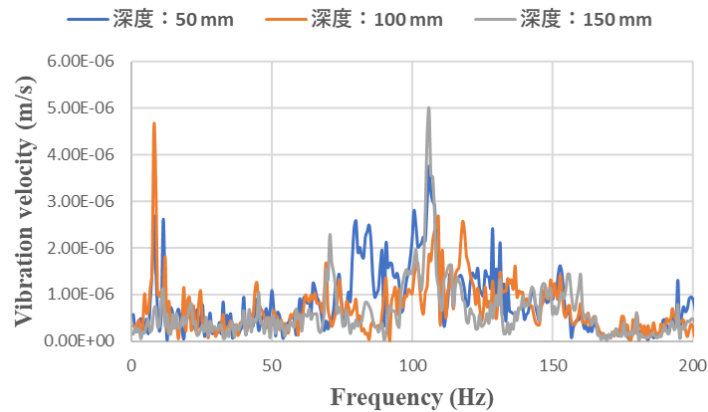


図 3.2.2.31 振動速度スペクトル：全点平均、300 mm ポールベース

### 3.2.2.3 つくばの埋設物試験場 2 における基礎実験 1 (直径 180 mm ホーロー容器) (実験セットアップ)

関東ロームに埋設された直径 180 mm のホーロー容器において、埋設深度を変化させた影響について検討を行った (2020 年 10 月 20 日実施)。実験風景写真を図 3.2.2.32、ポールベースの埋設位置イメージ図を図 3.2.2.33 に示す。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。図中における括弧内の数値は、計測後に調べた実測値である。実験時のセットアップ及び使用波形は前節と同じである。埋設深度別の計測時の設定について表 3.2.2.2 に示す。



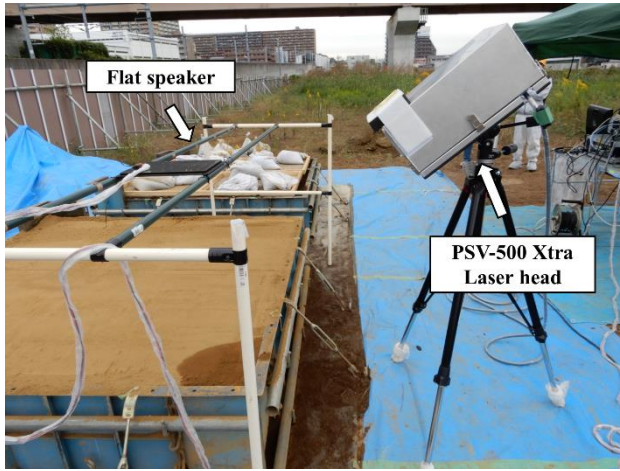


図 3.2.2.32 実験風景写真

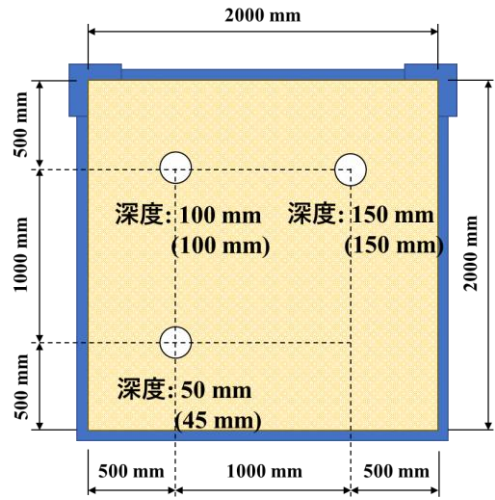


図 3.2.2.33 埋設位置イメージ図

表 3.2.2.2 計測設定

シングルトーンパースト波: 50-152 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm	埋設物無し
レーザ距離 [m]	1.13	1.97	2.01	1.13
音源距離 [m]	0.68	0.69	0.68	0.67
加算平均回数	5	5	5	5
最大音圧 [dB]	97.8	97.8	97.8	97.8
計測ポイント数	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

計測対象ごとの計測範囲図を図 3.2.2.34～図 3.2.2.36 に示す。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。計測範囲としては 260 mm～330 mm 程度に設定されており、埋設物である直径 180 mm のホーロー容器が十分に計測範囲に入る大きさになっている。また、計測密度に関しても 30 mm～40 mm 程度の間隔になっており、埋設物を検出するために必要な間隔になっている。

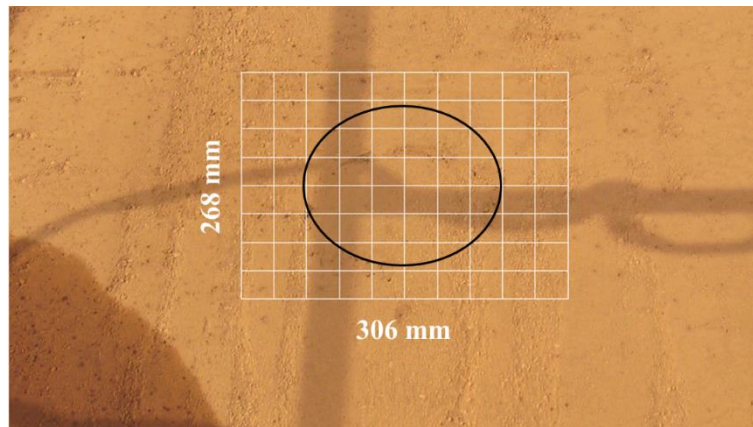


図 3.2.2.34 計測範囲図：埋設深度 50 mm

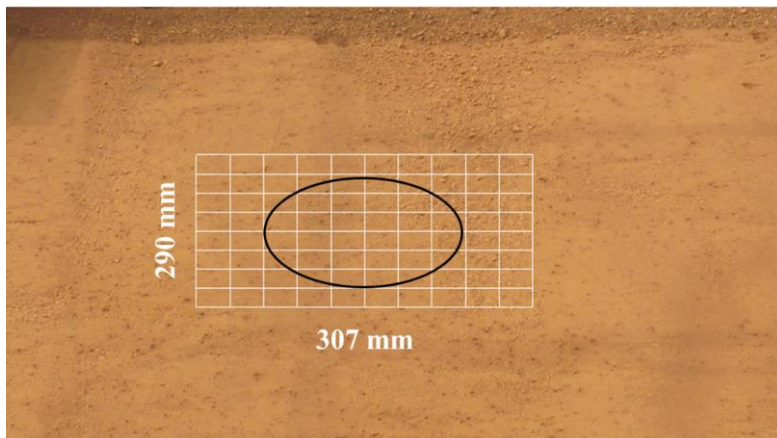


図 3.2.2.35 計測範囲図：埋設深度 100 mm

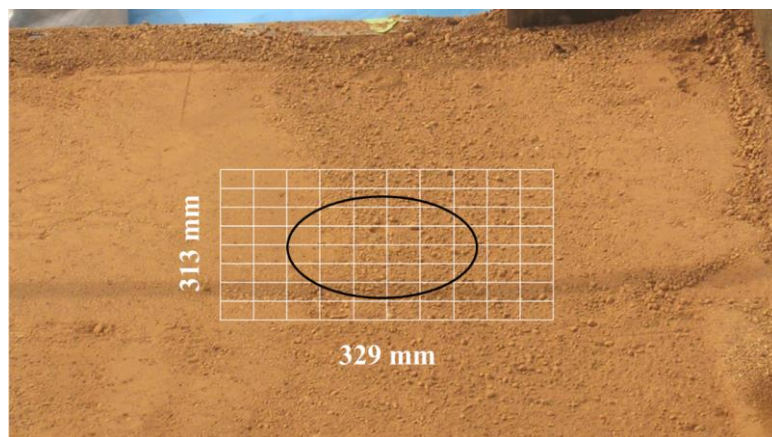


図 3.2.2.36 計測範囲図：埋設深度 150 mm

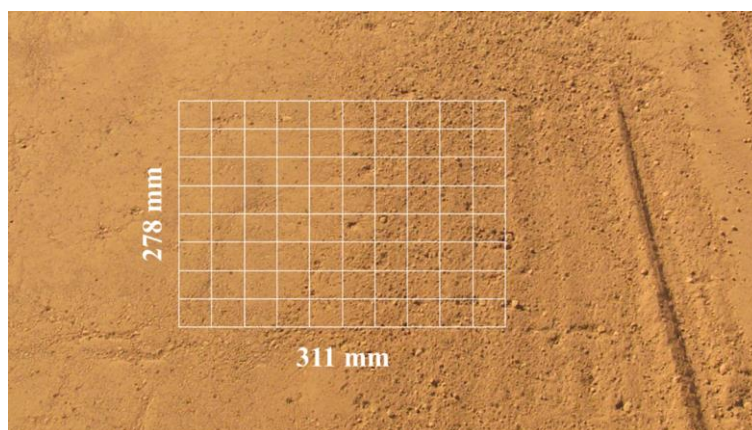


図 3.2.2.37 計測範囲図：埋設物無し

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.2.38～図 3.2.2.41 に示す。解析時には周波数フィルター(50-152 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm に関しては、埋設物の反応が確認できるが、100 mm および 150 mm の結果では明確に埋設物と断定するには困難な反応であった。原因の一つとして土の表面の状態が影響していると考えられる。特に 150 mm の土の表面において左側は概ね平らだが、右側は大きな粒が表面を覆っており、それがレーザ計測に悪影響を与えている可能性が高い。図 3.2.2.40 の分布を見てみると、右側の方は全体的に振動エネルギーが高くなっており、土の状態と一致している。これは埋設物の無しの結果にも言えることであり、土の状態が計測結果に大きな影響を与えていることが分かる。

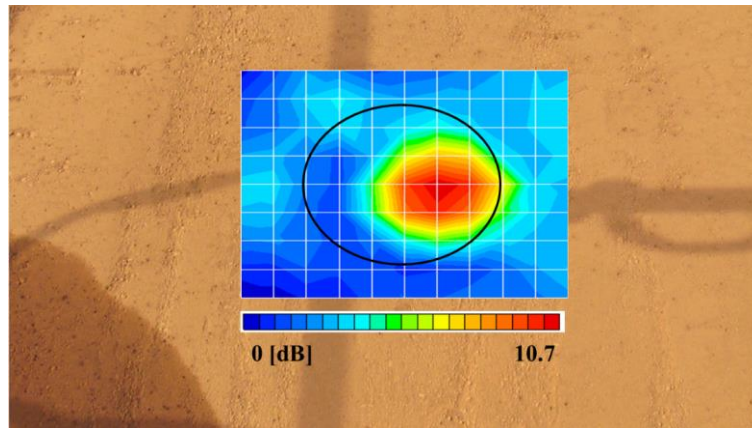


図 3.2.2.38 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 50 mm

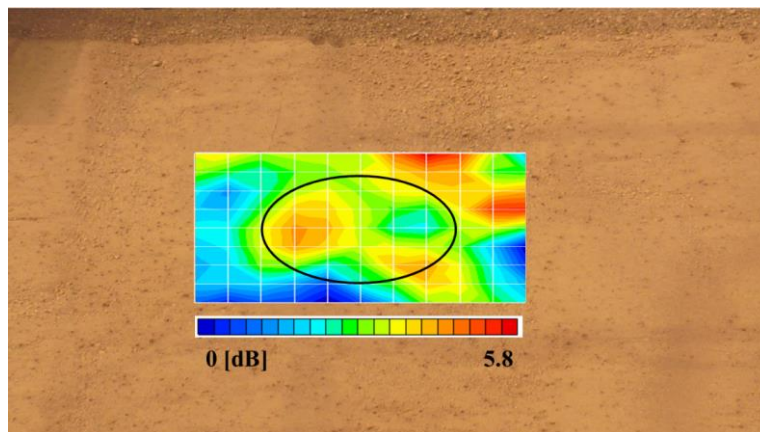


図 3.2.2.39 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 100 mm

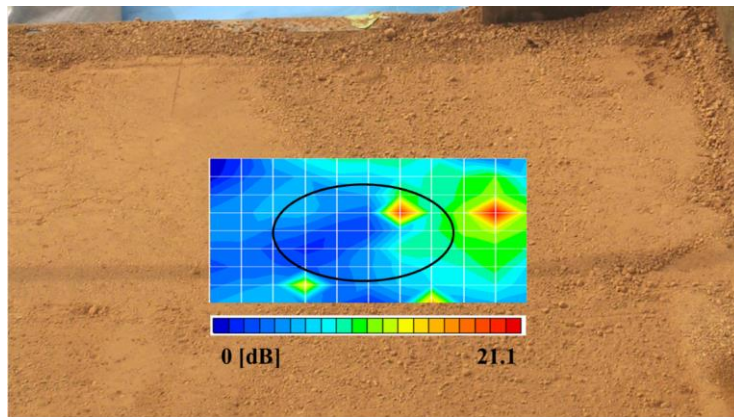


図 3.2.2.40 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 150 mm

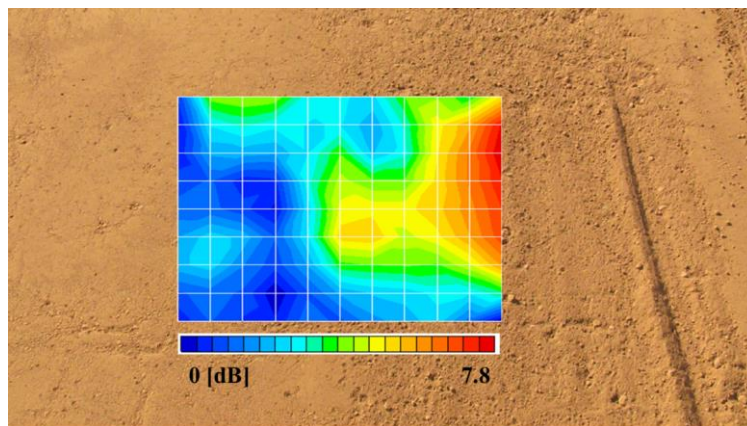


図 3.2.2.41 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設物無し

#### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物上の代表点における生データの振動速度波形を図 3.2.2.42、振動速度スペクトルを図 3.2.2.43 に示す。埋設深度 50 mm においては、広い周波数帯で埋設物の反応が検出されている。100 mm および 150 mm では、範囲は狭いが卓越した反応が確認できる。

次に計測点(99 ポイント)における全点平均の振動速度波形を図 3.2.2.44、振動速度スペクトルを図 3.2.2.45 に示す。全点平均すると埋設物無しも含め 100 Hz 付近を中心に値が山なりに像がしており、単純な判別は難しくなっている。ただし、埋設深度 50 mm のスペクトルにおける 80 Hz および 90 Hz 付近の卓越した反応は埋設物の振動であり、明確に判別可能である。

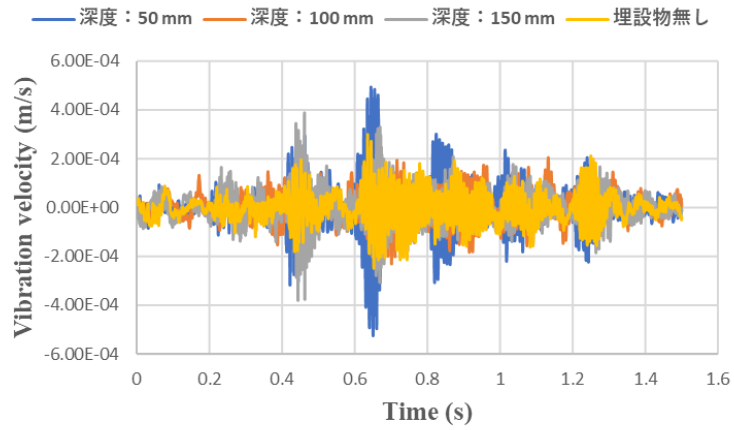


図 3.2.2.42 振動速度波形：代表点、180 mm ホーロー容器

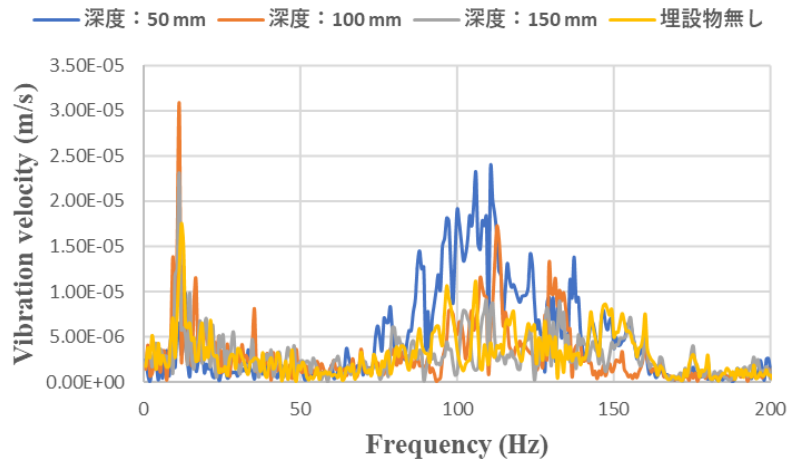


図 3.2.2.43 振動速度スペクトル：代表点、180 mm ホーロー容器

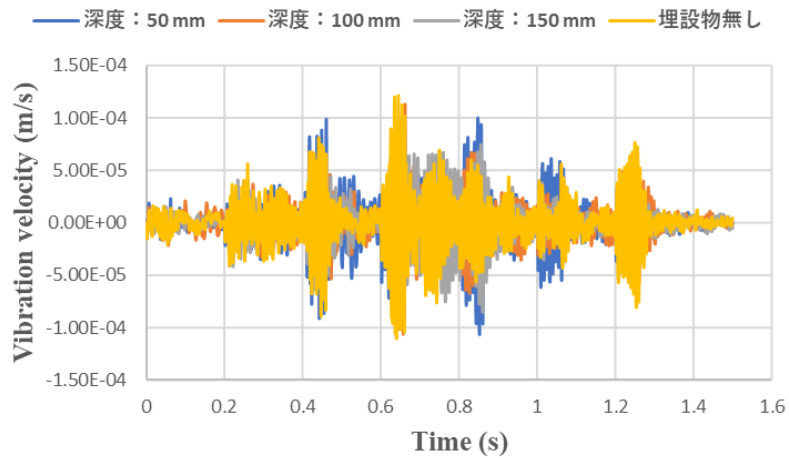


図 3.2.2.44 振動速度波形：全点平均、180 mm ホーロー容器

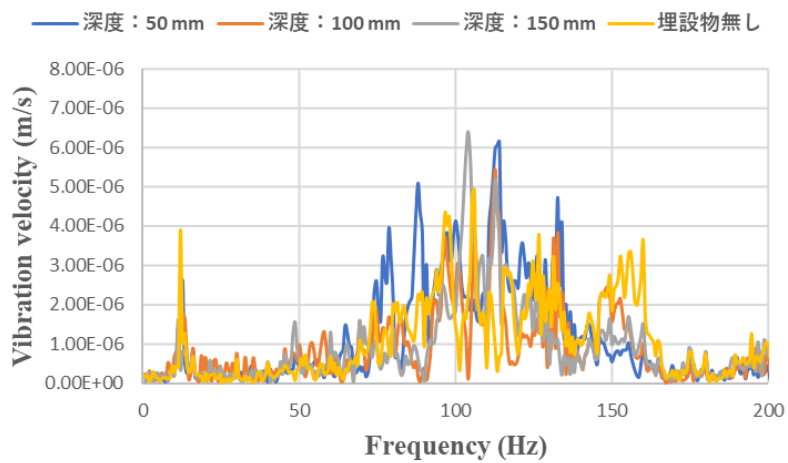


図 3.2.2.45 振動速度スペクトル：全点平均、180 mm ホーロー容器

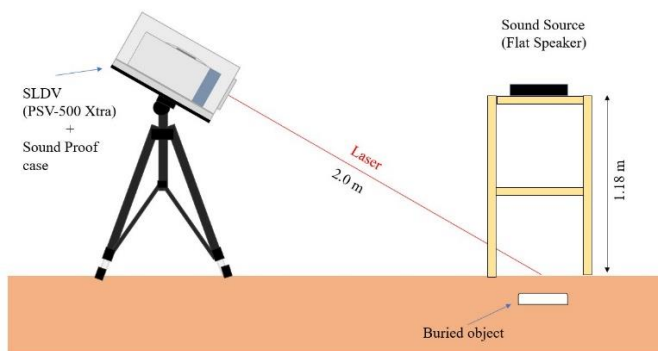
### 3.2.3 シルト（つくば表層土）の場合

#### 3.2.3.1 つくばの埋設物試験場 1 における基礎実験

##### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/01/22 のつくばの造成地において測定されたものである。埋設物は直径 300 mm の中空プラポールベースとし、埋設した深さは土壌表面から約 50, 100, 150 mm とした。実験セットアップを図 3.2.3.1 に示す。埋設物の直上の約 1 m に音源を設置し、埋設物から約 2 m の離隔でレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー (FPS INC, FPS2030M3P1R) であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra (Polytec Corp.) を使用した。なお、実験当日は時折小雨が降るような状況であったために、念のため、レーザドップラ振動計にはビニールをかけて測定した。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用い、地表面付近の音圧は約 92.5 dB とした。

(a)



(b)



図 3.2.3.1 つくば造成地における実験セットアップ図

(a) 実験セットアップ図、(b) 実験時の写真

##### (実験結果・・・深さ 50 mm)

深さ 50 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.2.3.2 に示す。



図 3.2.3.2 スキャンエリア図 (9×11=99 points)

計測点数は 99 (=9x11) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.3 に示す。

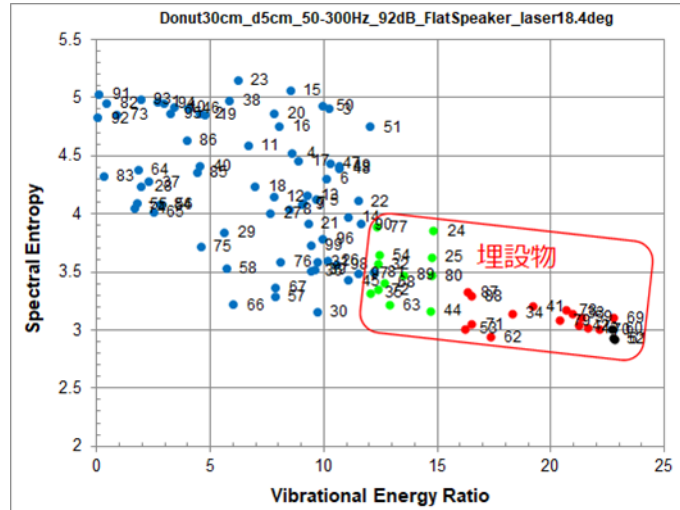


図 3.2.3.3 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

図より、埋設物上の計測点（赤点）では、振動エネルギー比が高くかつスペクトルエントロピーが低いという典型的な欠陥部の特徴を示していることがわかる。埋設物の周辺部の計測点（緑色）は埋設物上以外の計測点（青色）と埋設物上の計測点（赤点）の中間領域にあるため、比較的良好な埋設物探査が行えていることがわかる。埋設物上以外の計測点（青色）はややバラつきが大きいですが、これは土壌表面の締固め具合や表面に存在する細かい土粒子や小石等の影響によるものと思われる。次に振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.4 に示す。

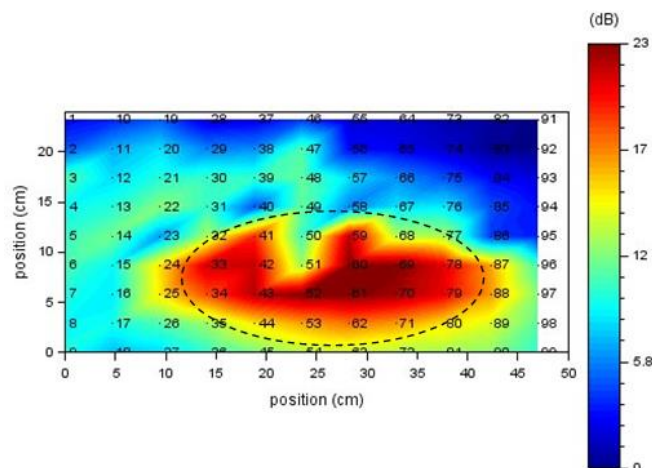


図 3.2.3.4 振動エネルギー比分布図（黒破線は埋設物の位置と大きさを示す）

図より、埋設物付近の振動エネルギー比が高いことが確認できる。



(実験結果・・・深さ 100 mm)

深さ 100 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.2.3.5 に示す。



図 3.2.3.5 スキャンエリア図 (9×15=135 points)

計測点数は 135 (=9×15) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.6 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.7 に示す。

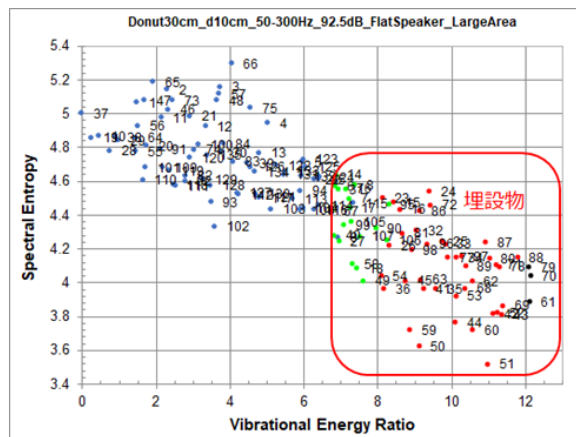


図 3.2.3.6 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

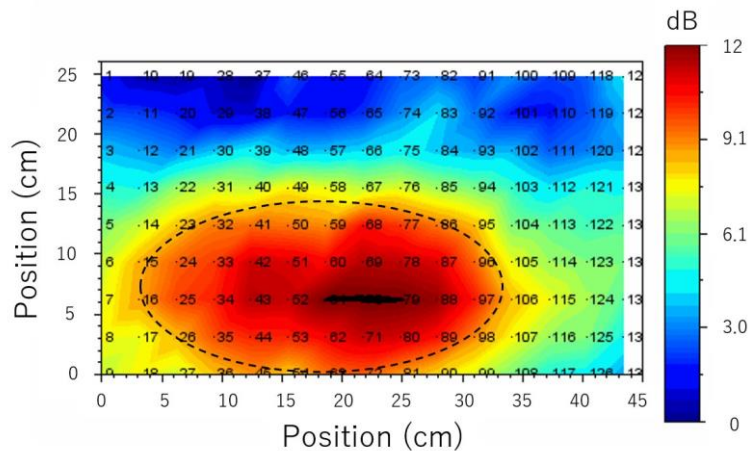


図 3.2.3.7 振動エネルギー比分布図 (黒破線は埋設物の位置と大きさを示す)

(実験結果・・・深さ 150 mm (その 1))

深さ 150 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.2.3.8 に示す。



図 3.2.3.8 スキャンエリア図 (9×15=135points)

計測点数は 77 (=7×11) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.9 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.10 に示す。

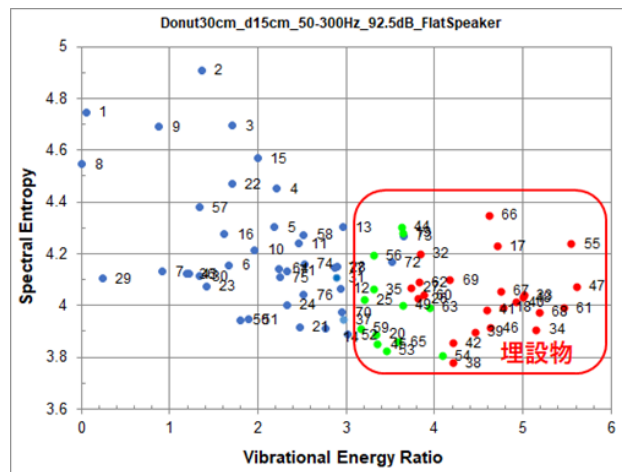


図 3.2.3.9 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

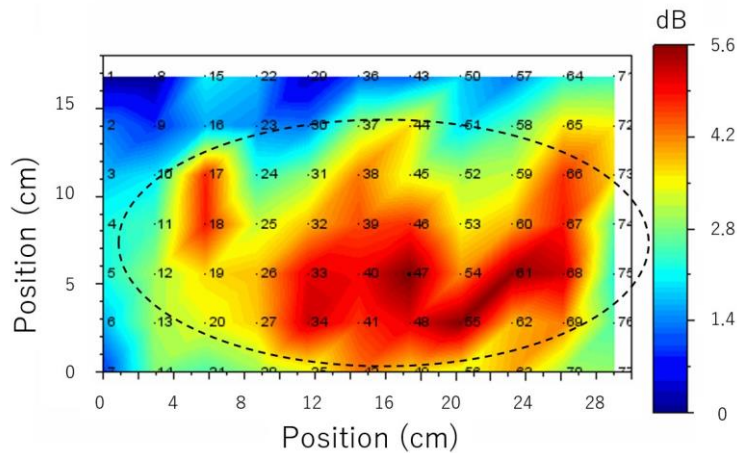


図 3.2.3.10 振動エネルギー比分布図 (黒破線は埋設物の位置と大きさを示す)

(実験結果・・・深さ 150 mm (その 2) )

同じ埋設物上で、スキャンエリアを拡大した際のスキャンエリアを図 3.2.3.11 に示す。



図 3.2.3.11 スキャンエリア図 (9×15=135points)

計測点数は 135 (=9×15) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.12 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.13 に示す。

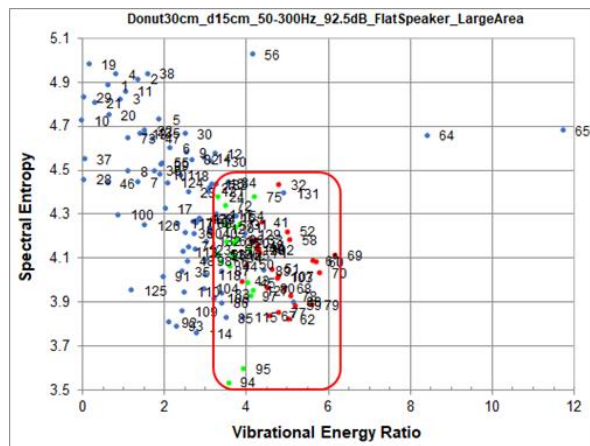


図 3.2.3.12 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

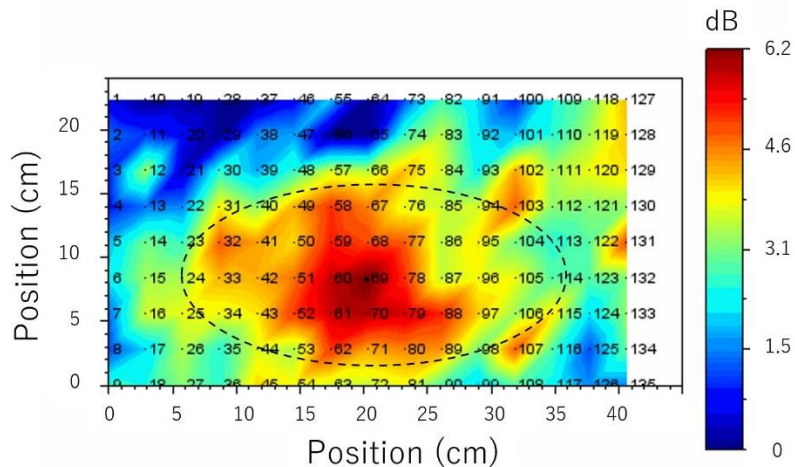


図 3.2.3.13 振動エネルギー比分布図 (黒破線は埋設物の位置と大きさを示す)

## (まとめ)

つくば造成地の表層土に直径 300 mm の中空プラポールベースを深さ 50~150 mm に埋設した場合の探査実験を、音源を高さ約 1 m に固定した場合について実施した。実験結果から、直径 300 mm の埋設物の場合には深さ 150 mm でも検出可能であることが確認できた。

## 3.2.3.2 厚木の埋設物試験場における基礎実験

## (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/02/04 の佐藤工業(厚木)の埋設物試験場で測定されたものである。ただし、土壌としてはつくばの造成地における表層土(シルト)を用いている。埋設物は直径 180 mm のホーロー容器とし、埋設した深さは土壌表面から約 50,100,150 mm とした。実験セットアップを図 3.2.3.14 に示す。埋設物の直上の約 1 m に音源を設置し、約 1.5 m にレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra を使用した。また、測定前には、土の上に板と砂利を詰めた袋を置いて加圧を行っている(約 2×1 m<sup>2</sup>のコンパネ板 2 枚に、土嚢袋 5 kg×24 個を乗せた)。

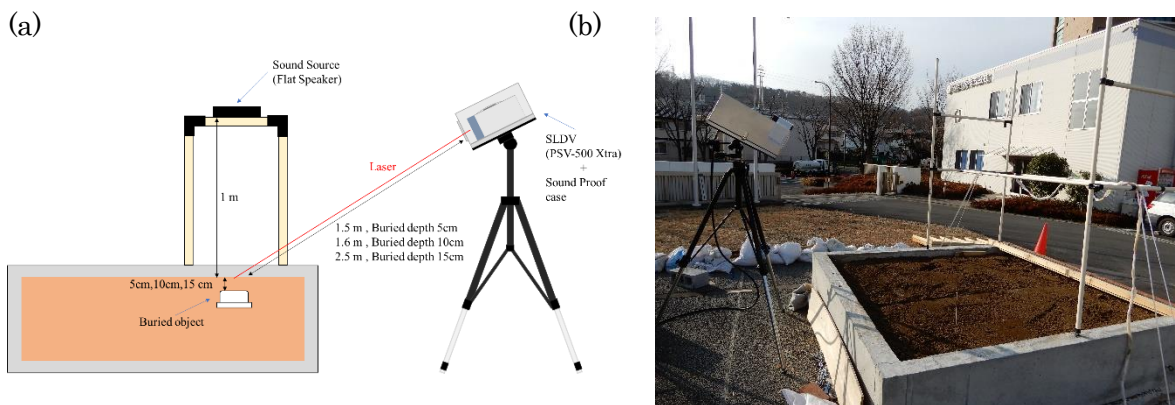


図 3.2.3.14 実験セットアップ

(a)実験セットアップ図、(b)実験風景

測定に使用した音波はマルチトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 50 Hz ~ 300 Hz、変調周波数 25 Hz、パルス幅 20 ms、波形の長さは 250 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 94.3 dB である。図 3.2.3.15 に波形例を示す。

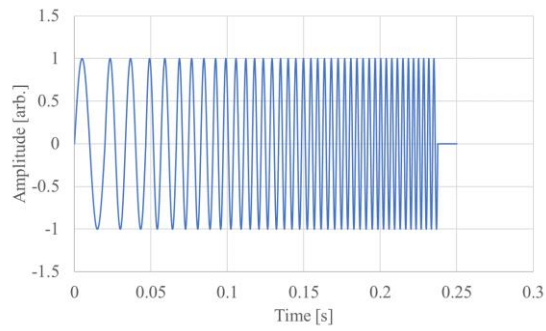


図 3.2.3.15 送信波形例

また、図 3.2.3.16 に測定エリアを示し、表 3.2.3.1 に測定点数と測定点間隔を示す。

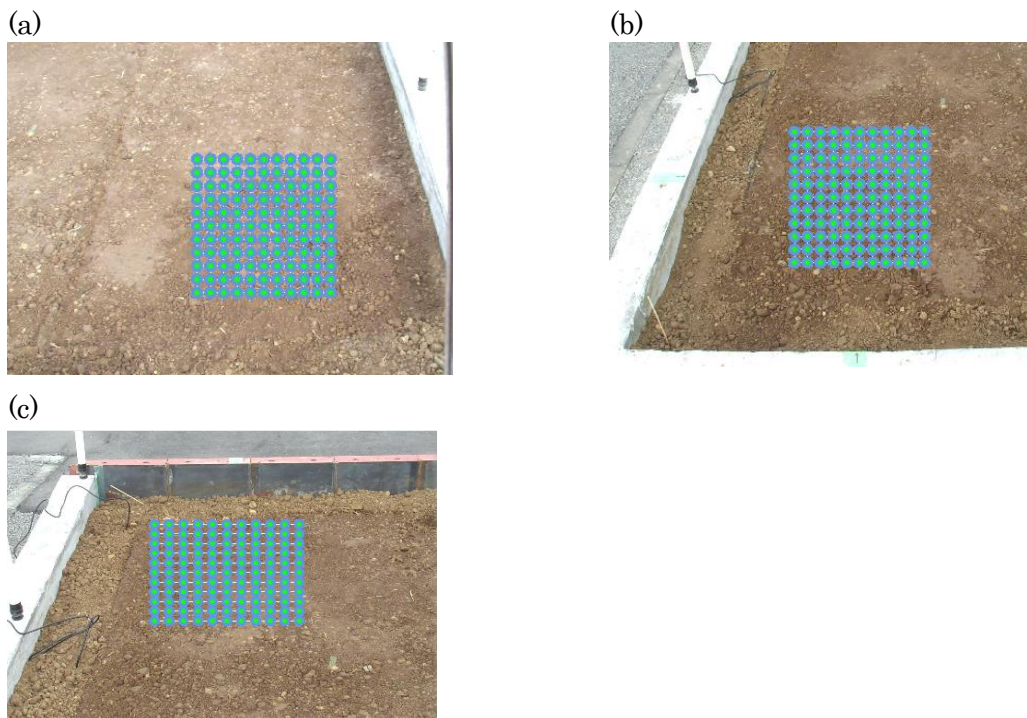


図 3.2.3.16 測定エリア

(a)埋設深さ 50 mm、(b) 埋設深さ 100 mm、(c) 埋設深さ 150 mm

表 3.2.3.1 測定点数と測定点間隔

Buried depth [cm]	Measurement Points	Distance between measurement points	
		Horizontal [cm]	Vertical [cm]
5	121 (11×11)	3.5	3.5
10	121 (11×11)	3.7	3.8
15	121 (11×11)	4.4	2.9

(実験結果・・・直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.3.17 に振動エネルギー分布を示す。積分範囲は 50~300 Hz であり、照射音波の帯域と同じ帯域とした。カラースケールは各測定場所の最大最小値となっている。

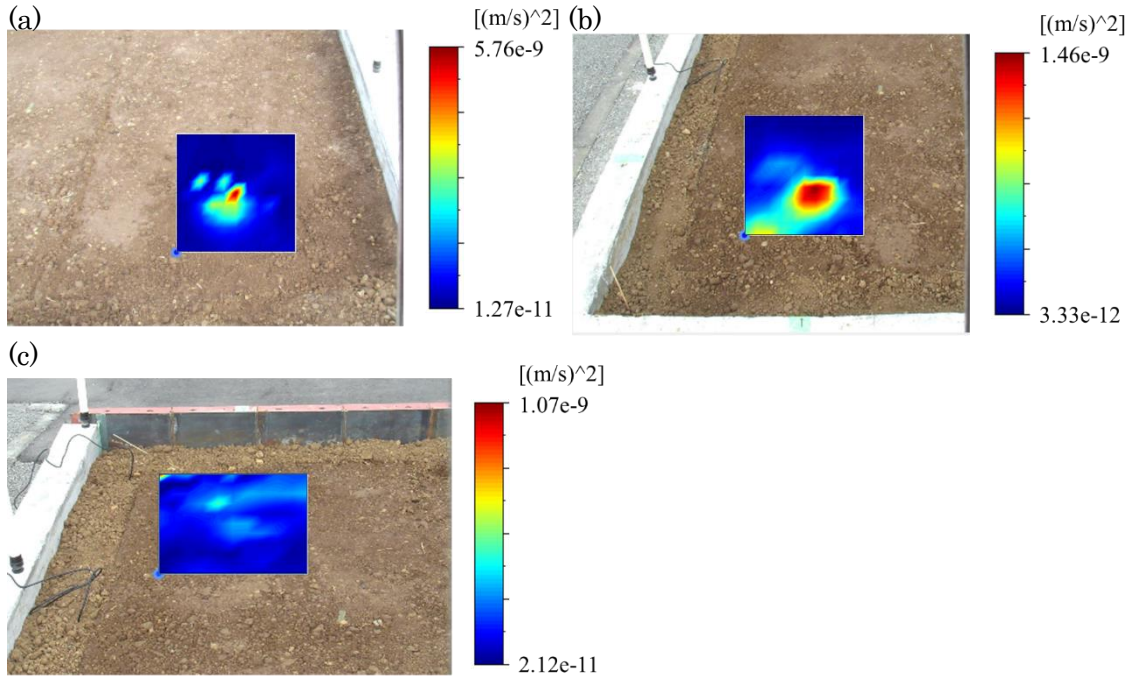


図 3.2.3.17 振動エネルギー分布

(a)埋設深さ 50 mm、(b) 埋設深さ 100 mm、(c) 埋設深さ 150 mm

図 3.2.3.17 より埋設物の深さが 50 mm と 100 mm は周囲より振動エネルギーが高い場所があり、かつ高い値を示す箇所が密集し丸く見える。一方、埋設物の深さが 150 mm は先に述べたような傾向が確認出来ないため、埋設物の有無の判定は難しいと考えられる。次に、埋設深さ毎の振動エネルギーを比較したグラフを図 3.2.3.18 に示す。

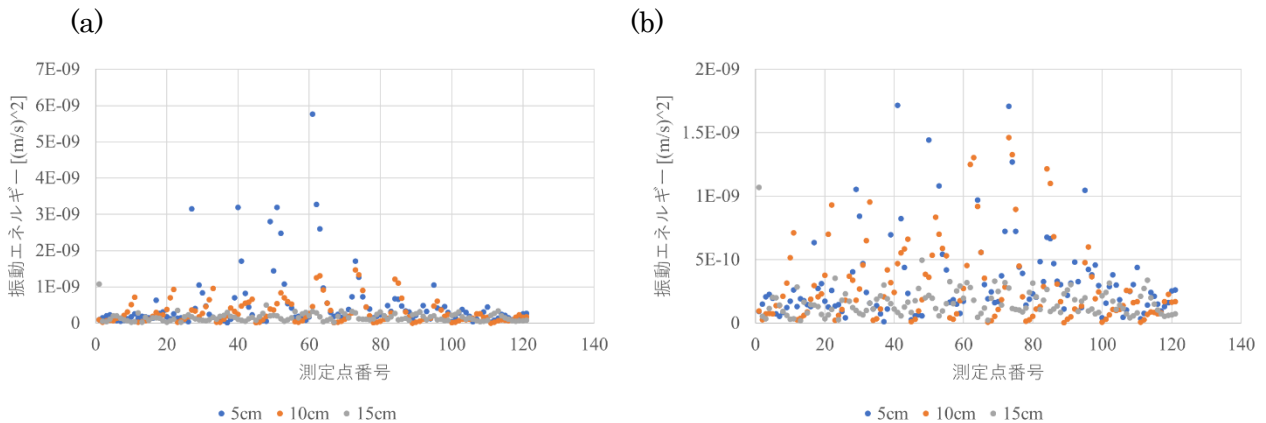


図 3.2.3.18 振動エネルギー比較 (a)全体、(b)拡大

図 3.2.3.18 より、埋設物上ではない測定点の振動エネルギーの値が約  $5e-10$  (m/s)<sup>2</sup> 以下に集中している事が確認出来る。埋設深さ 50 mm, 100 mm では  $5e-10$  (m/s)<sup>2</sup> 以上の値を示す測定点が多数あることから、検出が出来る可能性はあると思われる。次に、図 3.2.3.17 の埋設深さ毎の振動エネルギー分布のカラースケールの最大最小値を同じ値にした結果を図 3.2.3.19 に示す。

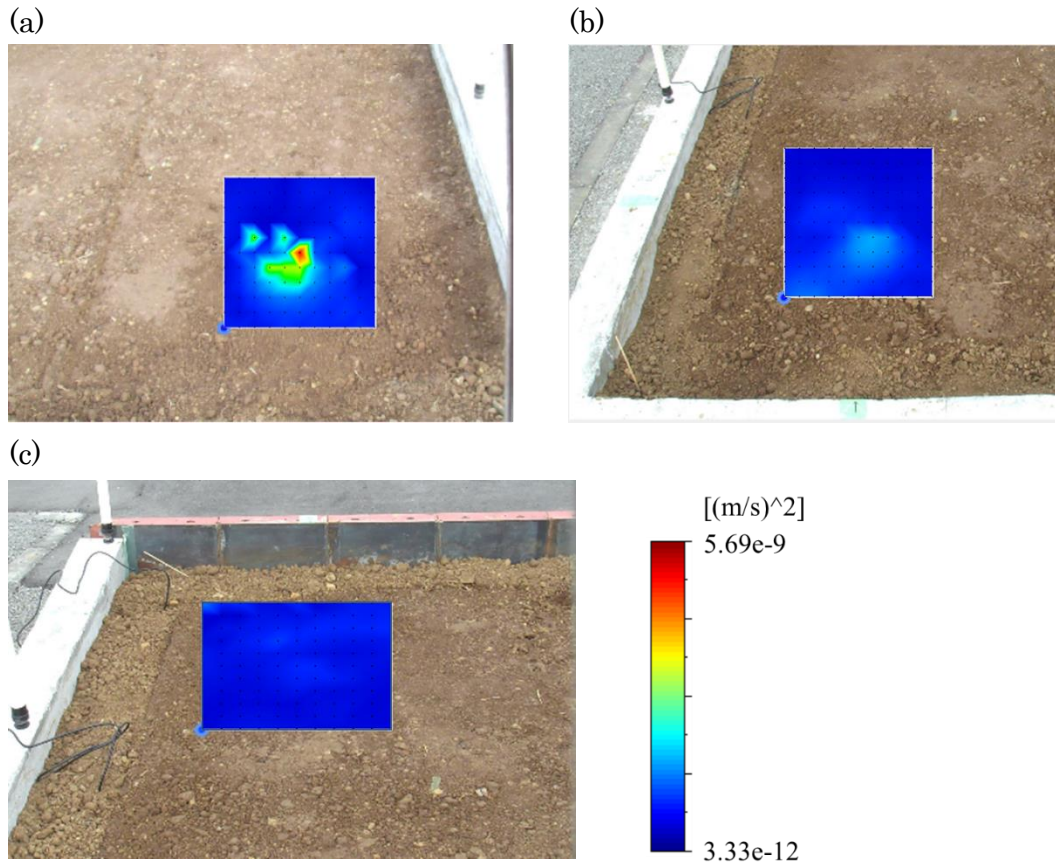


図 3.2.3.19 振動エネルギー分布 (カラースケール統一後)  
(a)埋設深さ 50 mm、(b) 埋設深さ 100 mm、(c) 埋設深さ 150 mm

図 3.2.3.19 より、埋設深さ 50 mm は明瞭に値が高い場所が確認出来るが、埋設深 100 mm と埋設深さ 150 mm は明瞭ではない。ただし、上記の図 3.2.3.18 の結果もあるので、埋設物が無い場所に対して値に有意差があるかつ高い値を示す測定点が密集・隣接しているかを考慮する必要があると思われる。

### 3.2.4 赤土の場合

#### 3.2.4.1 厚木の埋設物試験場における基礎実験(180 mm ホーロー容器)

##### (実験セットアップ)

厚木の埋設物試験場において、直径 180 mm のホーロー容器を埋設した場合の実験が行われた(2020年8月17日)。実験風景写真を図 3.2.4.1、ホーロー容器の埋設位置図を図 3.2.4.2 に示す。実験では計測時間短縮のため、一方向からの計測であったため対象の埋設物により計測距離に差異が存在する。実験時のセットアップ図を図 3.2.4.3 および図 3.2.4.4 に示す。加振用音源である平面音源は両端を脚立で支えられた角材の上に固定し、振動計測用のレーザヘッドは斜めからの計測が行われた。

加振用波形としては、周波数範囲 100-600 Hz のマルチトーンバースト波および 50-200 Hz のシングルトーンバースト波を使用した。波形の周波数範囲を変えた理由については後述するが、実験の結果、100 Hz 前後に埋設物の反応が確認されたため周波数範囲を縮小した。また、実験では埋設深度による影響についても検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。

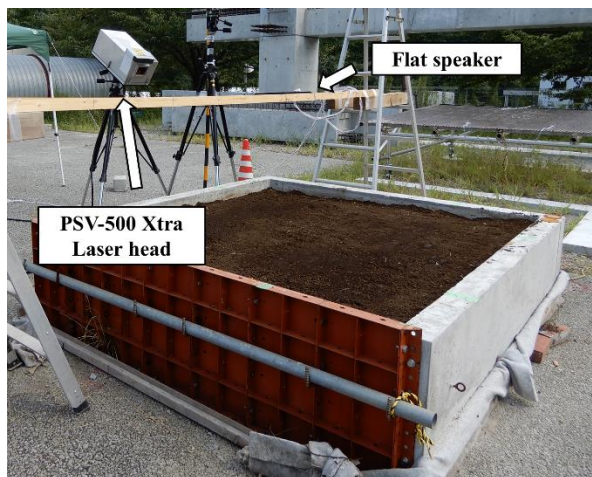


図 3.2.4.1 実験風景写真

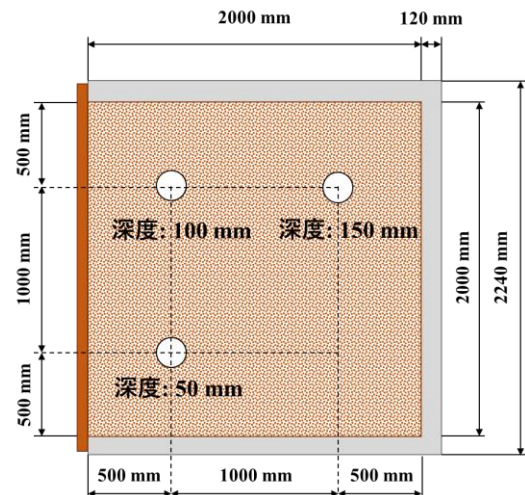


図 3.2.4.2 埋設位置イメージ図

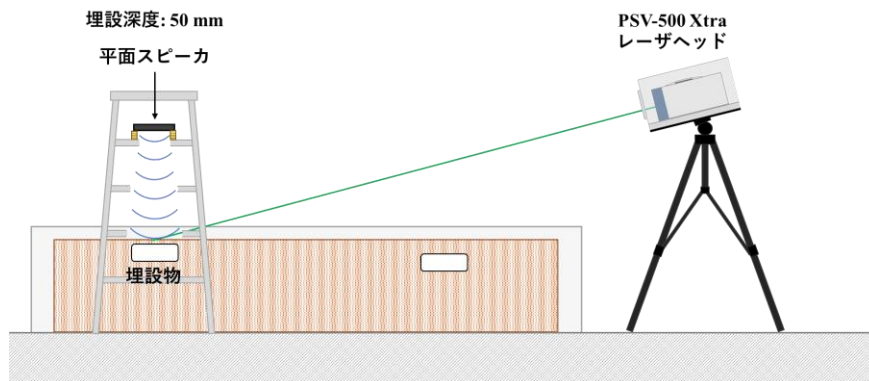


図 3.2.4.3 実験セットアップ図：埋設深度 50 mm



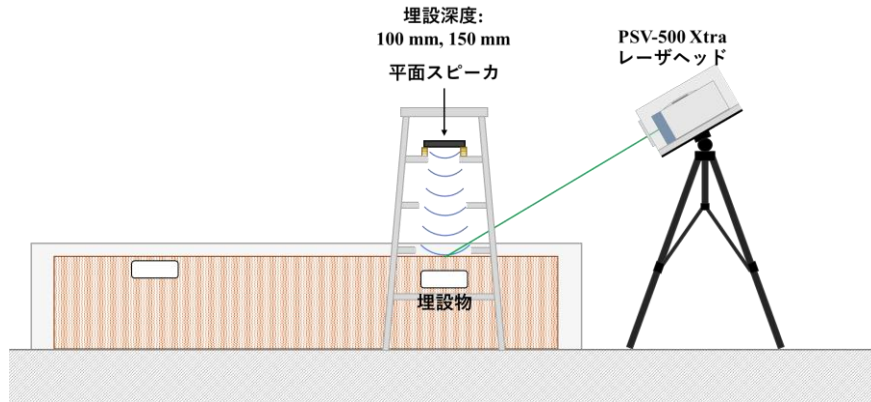


図 3.2.4.4 実験セットアップ図：埋設深度 100 mm, 150 mm

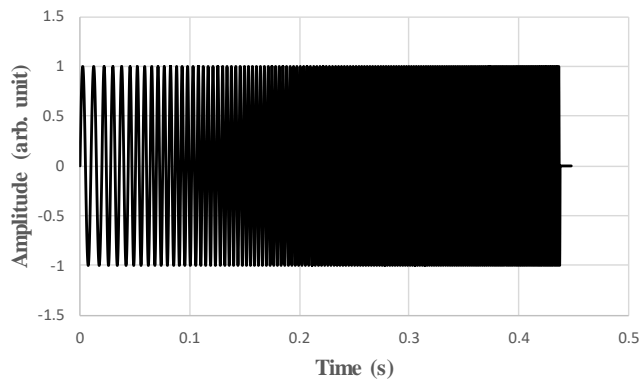
また、100-600 Hz マルチトーンバースト波計測における計測設定を表 3.2.4.1 に示す。

表 3.2.4.1 計測設定：マルチトーンバースト波

マルチトーンバースト波: 100-600 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm
レーザー距離 [m]	2.10	1.76	1.73
音源距離 [m]	0.79	0.79	0.80
加算平均回数	5	5	5
最大音圧 [dB]	103.7	104.3	104.3
計測ポイント数	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11

#### (加振用波形：100-600 Hz マルチトーンバースト波)

加振用波形であるマルチトーンバースト波を図 3.2.4.5 に示す。周波数範囲は 100-600 Hz、変調周波数は 25 Hz、各周波数のパルス幅は 20 ms、波形の全体時間は 448 ms に設定された。100-600 Hz マルチトーンバースト波計測における計測設定を表 3.2.4.1 に示す。



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

図 3.2.4.5 使用波形：マルチトーンバースト波 100-600 Hz

**(振動エネルギー比分布：100-600 Hz)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.6～図 3.2.4.8 に示す。解析時には周波数フィルター(100-600 Hz)のみを使用した。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。計測範囲としては 500～700 mm 程度に設定されており、埋設物である直径 180 mm のホーロー容器が十分に計測範囲に入る大きさになっている。また、計測密度に関しても 40～60 mm 程度の間隔になっており、埋設物を検出するために必要な間隔に設定された。

埋設深度 50 mm の結果である図 3.2.4.6 では、埋設物の反応が明確に検出されている。埋設深度 100 mm の結果である図 3.2.4.7 では、埋設物上に 1 点反応が検出されているが、上部にも複数反応が存在しており判別は困難な状態である。また、埋設深度 150 mm の結果である図 3.2.4.8 では、大きな反応の塊が存在しているが、想定位置と多少のずれが有り判断が難しい。

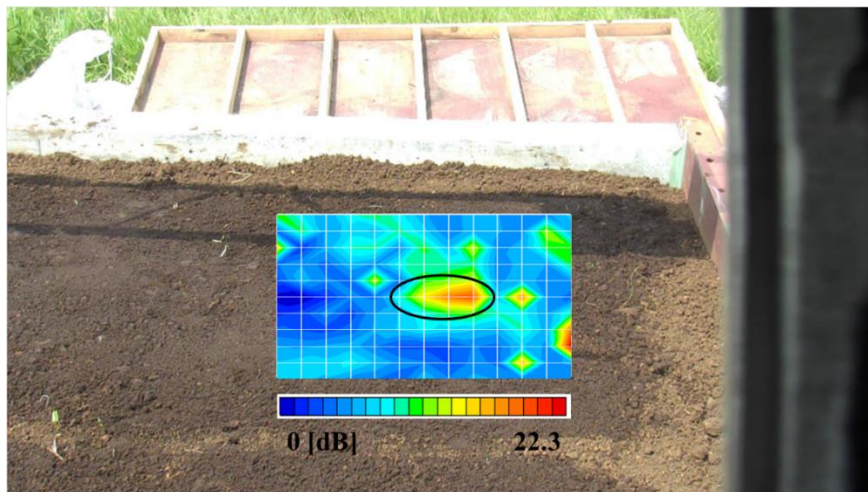


図 3.2.4.6 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布：100-600 Hz、深度 50 mm

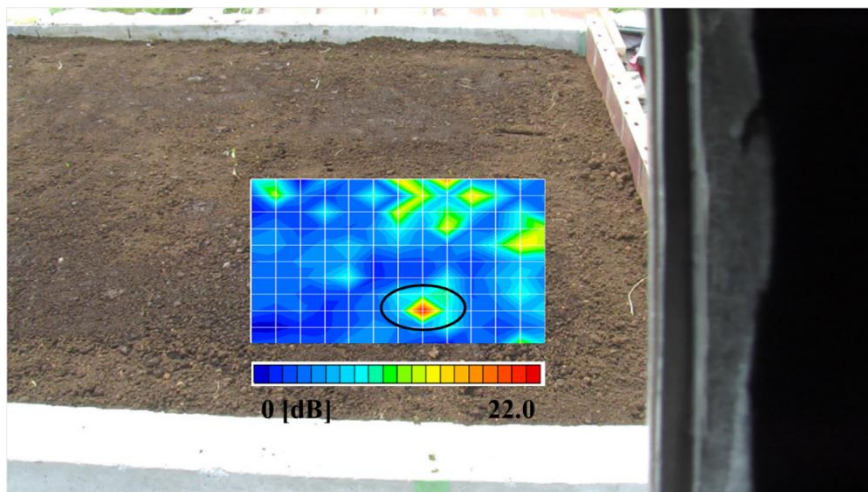


図 3.2.4.7 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布：100-600 Hz、深度 100 mm

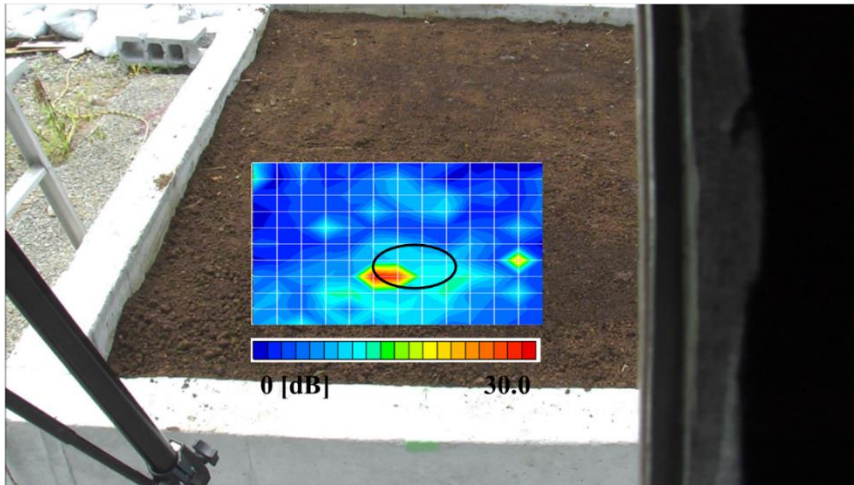


図 3.2.4.8 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布：100-600 Hz、深度 150 mm

#### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物中心付近の振動速度波形を図 3.2.4.9、振動速度スペクトルを図 3.2.4.10 に示す。振動速度波形においては 0.1 秒前後および 0.4 秒前後に埋設深度に反比例する形で、振幅が減少していることが確認できる。これは埋設物直上における土量の増加による影響である。振動速度スペクトルにおいては、100 Hz 前後および 600 Hz 前後に埋設深度と振幅に関連性が見られる結果が得られた。スペクトル上ではいくつかの卓越した反応が検出されたため、埋設深度 50 mm における代表的な周波数の反応を図中に示す。

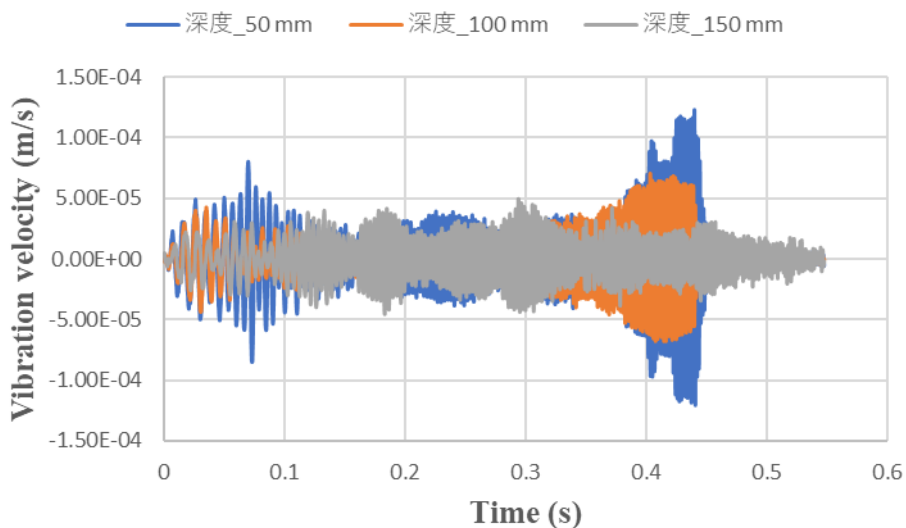


図 3.2.4.9 振動速度波形：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

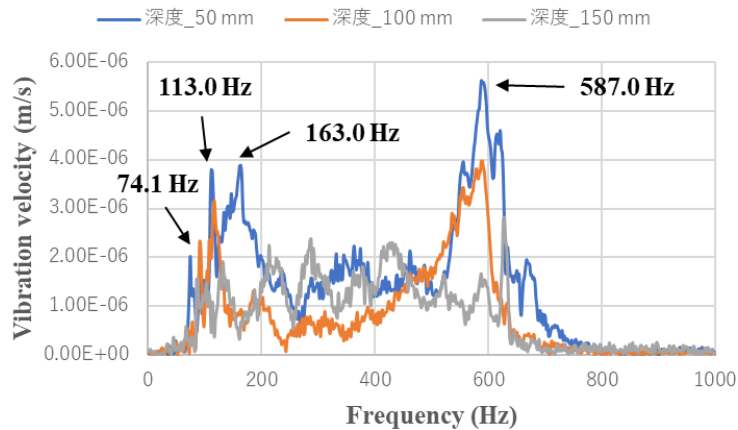
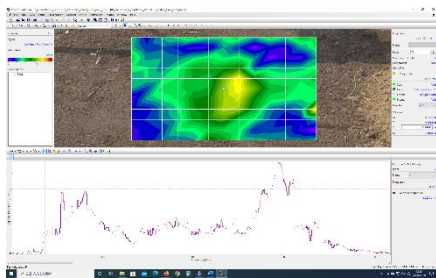


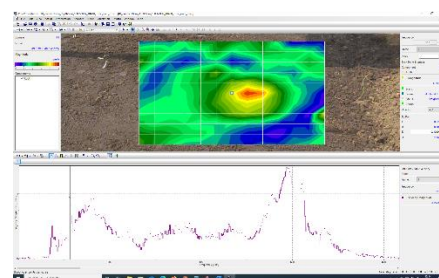
図 3.2.4.10 振動速度スペクトル：埋設深度別、180 mm ホーロー容器、埋設深度 50 mm における卓越した周波数

前述した代表的な周波数における埋設深度 50 mm の振動速度分布を図 3.2.4.11 に示す。図中の上が各周波数における振動速度分布であり、下が全計測点(143 点)における中心点(Data\_72)の振動速度スペクトルである。74.1 Hz、113.0 Hz、163.0 Hz、587.0 Hz 全てで埋設物の反応が確認できる。その中で、特に 113.0 Hz の結果において埋設物の形状が推測できるほどに明確な反応が確認されており、この周波数が 180 mm ホーロー容器を検出するのに適した周波数であると考えられる。そこで、次に 74.1 Hz および 163.0 Hz を含んだ周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行った。

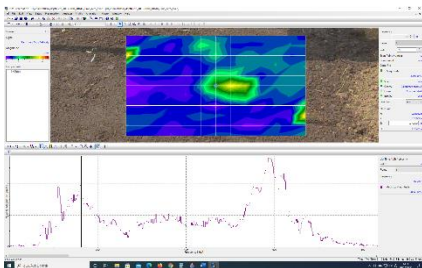
(a) 74.1 Hz



(b) 113.0 Hz



(c) 163.0 Hz



(d) 587.0 Hz

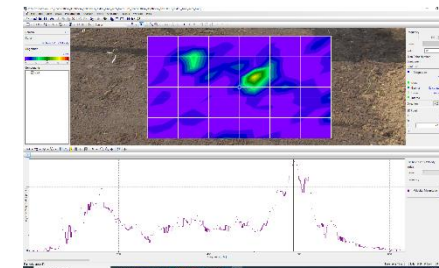
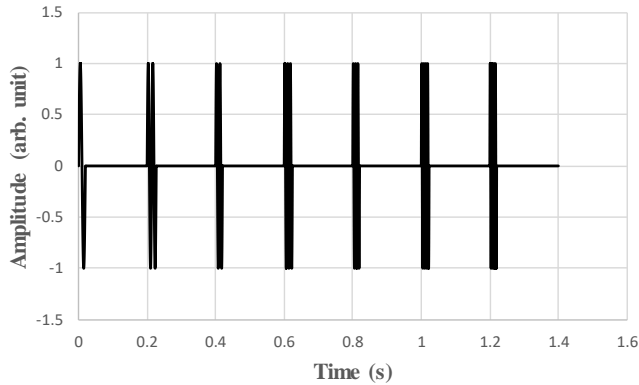


図 3.2.4.11 振動速度分布およびスペクトル：埋設深度 50 mm、Data\_72 (中心点)

(a) 74.1 Hz (b) 113.0 Hz (c) 163.0 Hz (d) 587.0 Hz

**(加振用波形：50-200 Hz シングルトーンバースト波)**

加振用波形であるシングルトーンバースト波を図 3.2.4.12 に示す。周波数範囲は 50-200 Hz、変調周波数は 25 Hz、各周波数のパルス幅は 20 ms、インターバルタイムは 200 ms、波形の全体時間は 1400 ms に設定された波形である。



周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.2.4.12 使用波形：シングルトーンバースト波 50-200 Hz

**(振動エネルギー比分布：50 -200 Hz)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.13～図 3.2.4.16 に示す。解析時には周波数フィルター(50-200 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm の結果では、埋設物の反応が明確に検出された。また、埋設深度 100 mm の結果では、周囲にも反応が存在するが埋設物の反応も検出されている。しかし、埋設深度 150 mm の結果では埋設物上に 1 点しか反応が存在せず、埋設物の判別が困難であると考えられる。埋設物無しの結果では、埋設物が存在しないにも関わらず右側に大きな反応が検出された。これは土壌の状態や風による計測用レーザの振動が原因で、ノイズとしてこのように検出されたと考えられる。

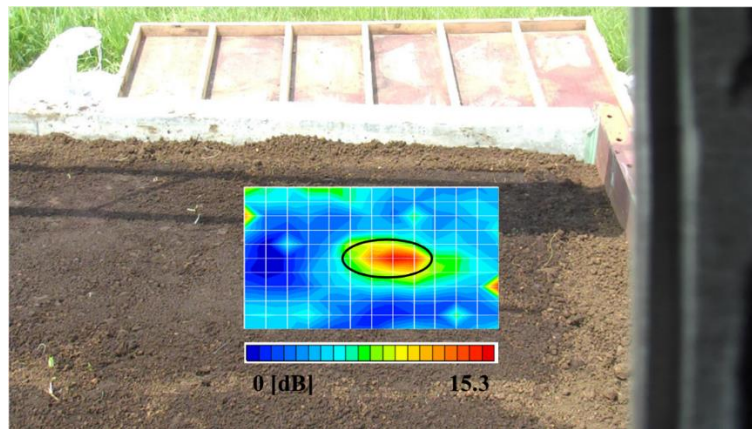


図 3.2.4.13 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,50-200 Hz,埋設深度 50mm

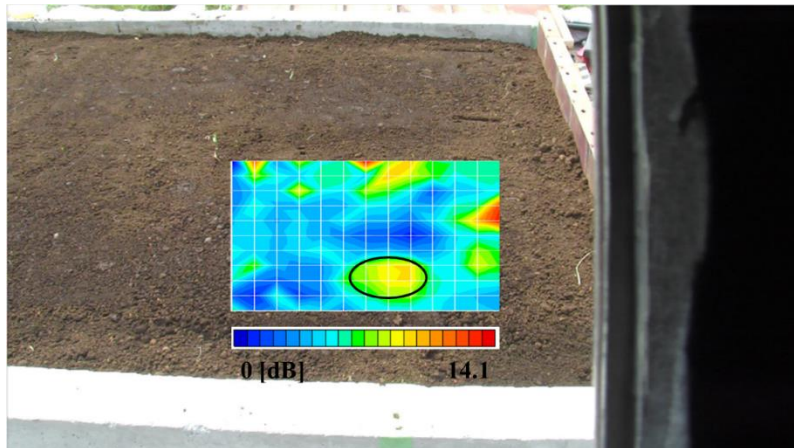


図 3.2.4.14 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,50-200 Hz,埋設深度 100 mm

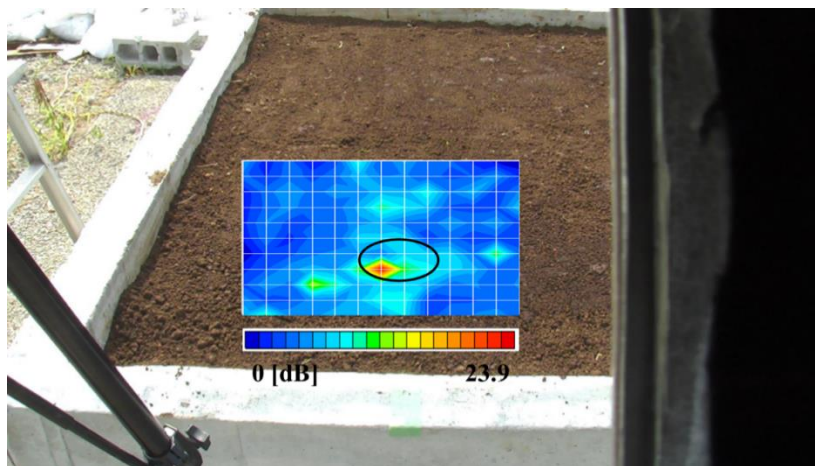


図 3.2.4.15 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,50-200 Hz,埋設深度 150 mm

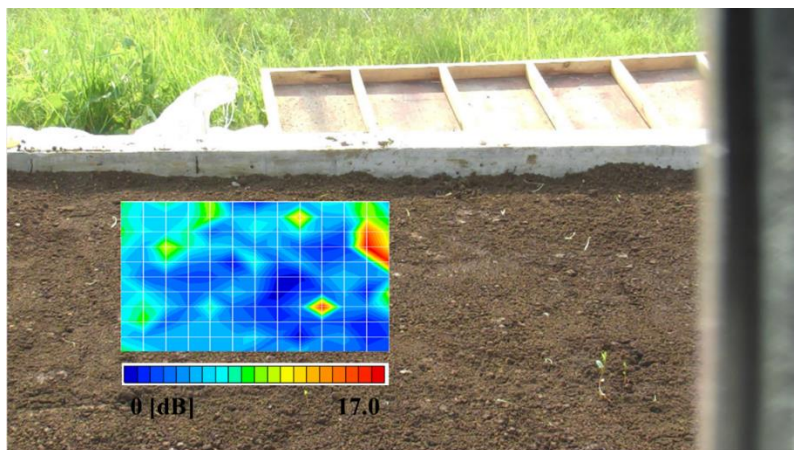


図 3.2.4.16 埋設物が無い場合の振動エネルギー比分布,50-200 Hz

### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物中心付近の振動速度波形を図 3.2.4.17、拡大した波形を図 3.2.4.18 に示す。また同計測点の振動速度スペクトルを図 3.2.4.19 に示す。これらのデータは加振周波数の領域外をカットするため 50-200 Hz のバンドパスフィルタがかけられている。

振動速度波形においては埋設深度に反比例する形で、振幅が減少していることが確認できる。これは埋設物直上における土量の増加による影響である。埋設物無しが一番小さくなる理由は土量が最大になるためであると考えられる。

振動速度スペクトルにおいても、周波数のずれはあるが埋設深度と振幅に反比例の関係が見られた。これらの結果においても、卓越した反応がいくつか検出されたため、埋設深度 50 mm を例に代表的なものを図中に矢印で示す。

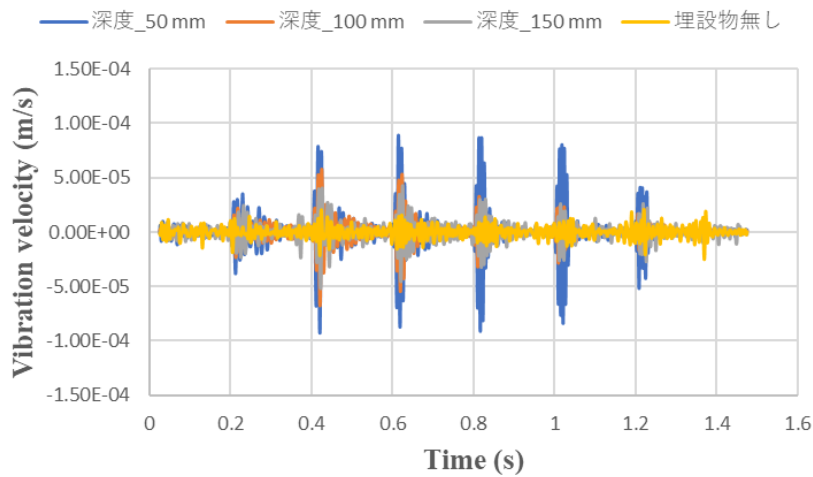


図 3.2.4.17 振動速度波形：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

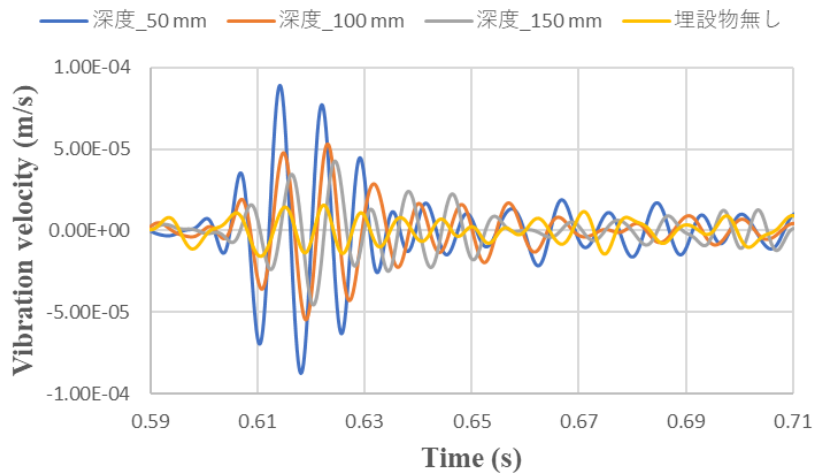


図 3.2.4.18 振動速度波形拡大：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

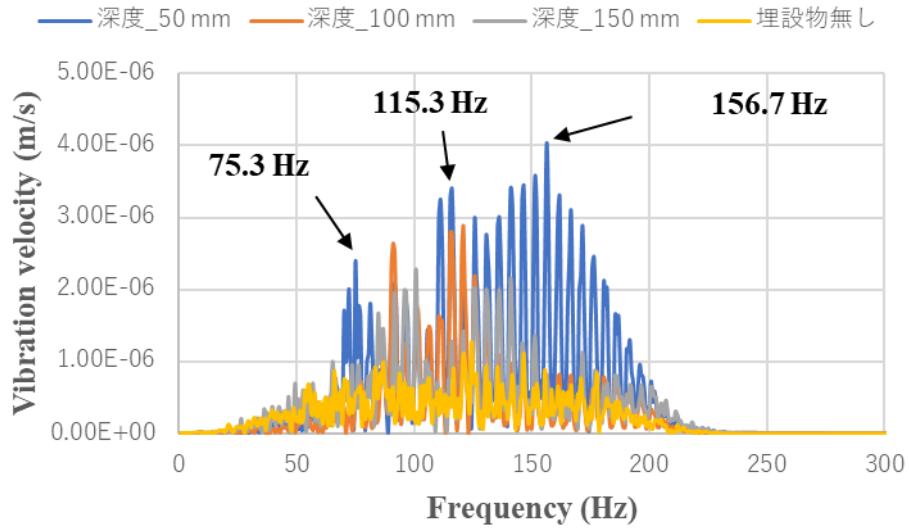
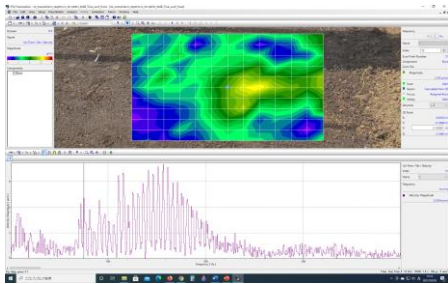


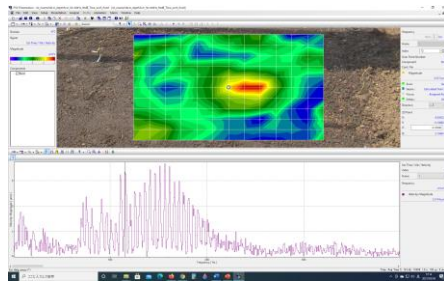
図 3.2.4.18 振動速度スペクトル：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

前述した代表的な周波数における埋設深度 50 mm の振動速度分布を図 3.2.4.19 に示す。図中の上が各周波数における振動速度分布であり、下が全計測点(143 点)における中心点 (Data\_72)の振動速度スペクトルである。下記における 115.3 Hz の結果において、特に強く埋設物の反応が検出されていることが分かる。

(a) 75.3 Hz



(b) 115.3 Hz



(a) 156.7 Hz

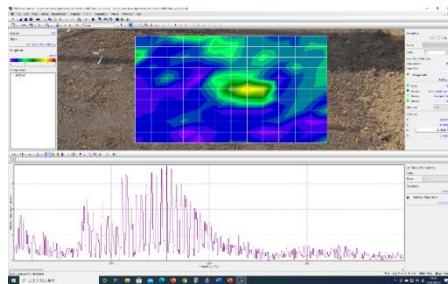


図 3.2.4.19 振動速度分布およびスペクトル：埋設深度 50 mm、Data\_72 (中心点)

(a) 75.3 Hz (b) 115.3 Hz (c) 156.7 Hz



## (積分範囲を狭めた場合)

前述した結果を受けて、100-600 Hz から 50-200 Hz に絞り込んだ周波数範囲をさらに絞り込み、100-140 Hz で計算した振動エネルギー比分布で比較を行った。図 3.2.4.20 は埋設深度 50 mm、Fig. 3.2.4.21 は埋設深度 100 mm、3.2.4.22 は埋設深度 150 mm における、100-600 Hz マルチトーンバースト波および 50-200 Hz シングルトーンバースト波で計測した結果である。図 3.2.4.20 では、周波数範囲を絞り込む前から確認できていたため変化が少ないが、より明瞭に埋設物の反応が見ることができる。特に効果が大いなのは図 3.2.4.21 における埋設深度 100 mm の結果である。周波数を絞り込んだことで、簡易に判別可能な程に埋設物の反応が発現している。



図 3.2.4.20 振動エネルギー比分布：100-140 Hz、埋設深度 50 mm

(a) 100-600 Hz マルチトーンバースト波 (b) 50-200 Hz シングルトーンバースト波



図 3.2.4.21 振動エネルギー比分布：100-140 Hz、埋設深度 100 mm

(a) 100-600 Hz マルチトーンバースト波 (b) 50-200 Hz シングルトーンバースト波

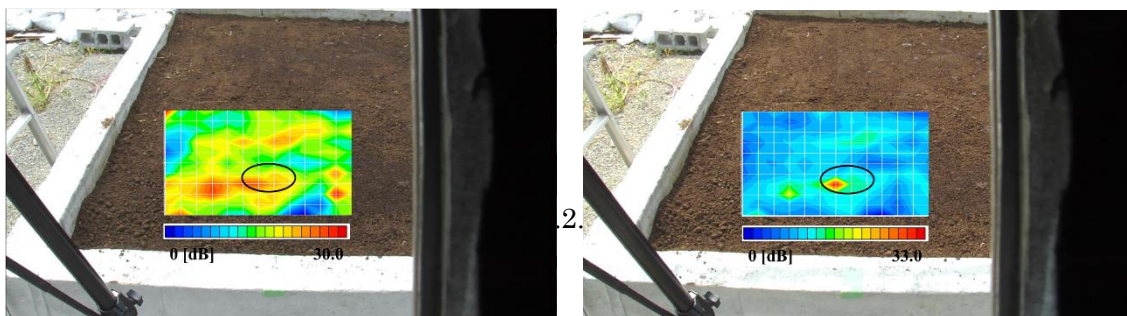


図 3.2.4.22 振動エネルギー比分布：100-140 Hz、埋設深度 150 mm

(a) 100-600 Hz マルチトーンバースト波 (b) 50-200 Hz シングルトーンバースト波

### 3.2.4.2 厚木の埋設物試験場における基礎実験(100 mm ホーロー容器)

#### (実験セットアップ)

厚木の埋設物試験場において、直径 100 mm のホーロー容器を埋設した場合の実験が行われた(2020年8月12日)。実験風景写真を図 3.2.4.23、ホーロー容器の埋設位置を図 3.2.4.24 に示す。実験時のセットアップは前節の 180mm ホーロー容器を用いた実験と同じである。加振用波形としては、周波数範囲 100-600 Hz のマルチトーンバースト波を使用した(前節と同じ)。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 20, 50, 100 mm と変化させた。計測時の設定について表 3.2.4.2 に示す。

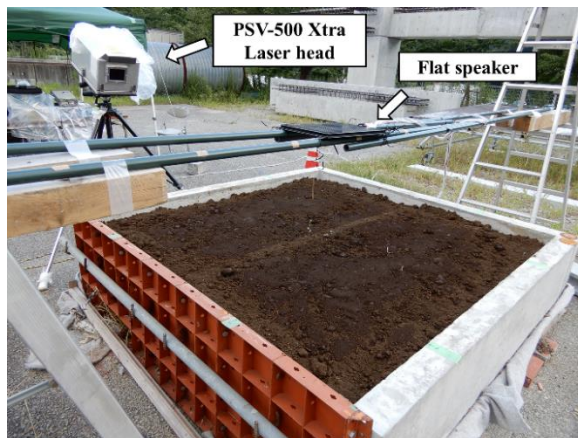


図 3.2.4.23 実験風景写真

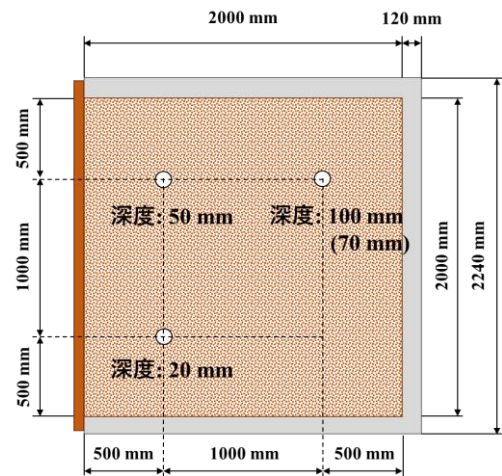


図 3.2.4.24 埋設位置イメージ図

表 3.2.4.2 計測設定

	埋設深度: 20 mm	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm
レーザ距離 [m]	2.10	1.67	1.66
音源距離 [m]	0.75	0.74	0.75
加算平均回数	5	5	5
最大音圧 [dB]	104.1	104.1	102.7
計測ポイント数	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11

#### (振動エネルギー比分布 : 100-600 Hz)

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.25～図 3.2.4.27 に示す。解析時には周波数フィルタのみを使用した。埋設深度 20 mm および 50 mm では、埋設物の反応が検出された。しかし、埋設深度 100 mm の結果では周囲にノイズが多数検出されており、埋設物の反応を判別困難な状態である。

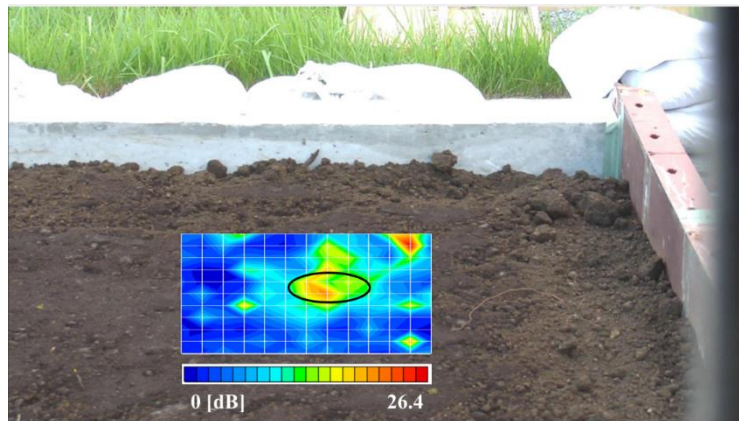


図 3.2.4.25 100mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,100-600 Hz,埋設深度 20 mm

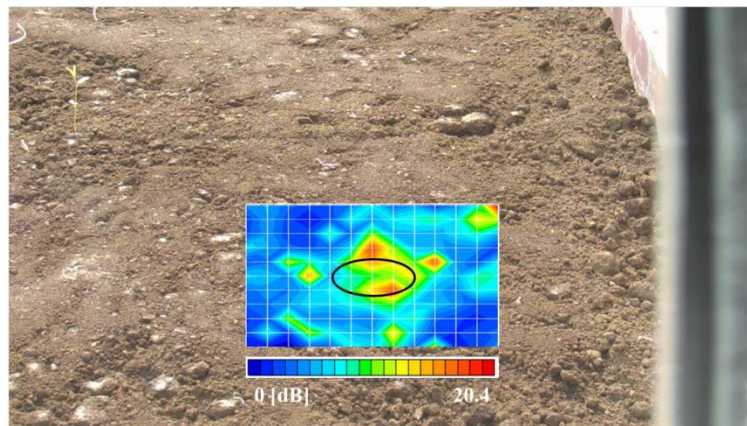


図 3.2.4.26 100mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,100-600 Hz,埋設深度 50 mm

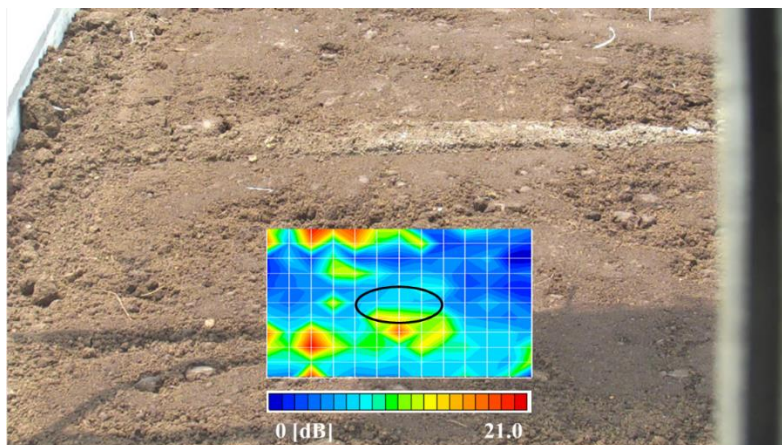


図 3.2.4.27 100mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,100-600 Hz,埋設深度 100 mm

### (振動波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物中心付近の振動速度波形を図 3.2.4.28、振動速度スペクトルを図 3.2.4.29 に示す。埋設物に反比例する形で、振幅が減少していることが確認できる。これは埋設物直上における土量の増加による影響であると推測される。しかし、今回の振動速度スペクトルにおける、埋設深度による明確な周波数の変化等は確認が困難である。原因として、埋設物と思われる反応が広い帯域で確認されており、周波数の変化が特定しづらいことが挙げられる。

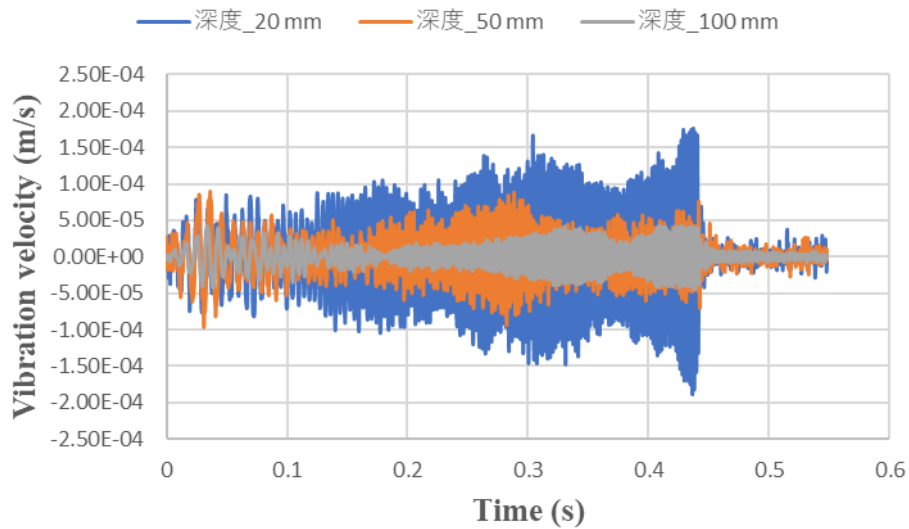


図 3.2.4.28 振動速度波形：埋設深度別

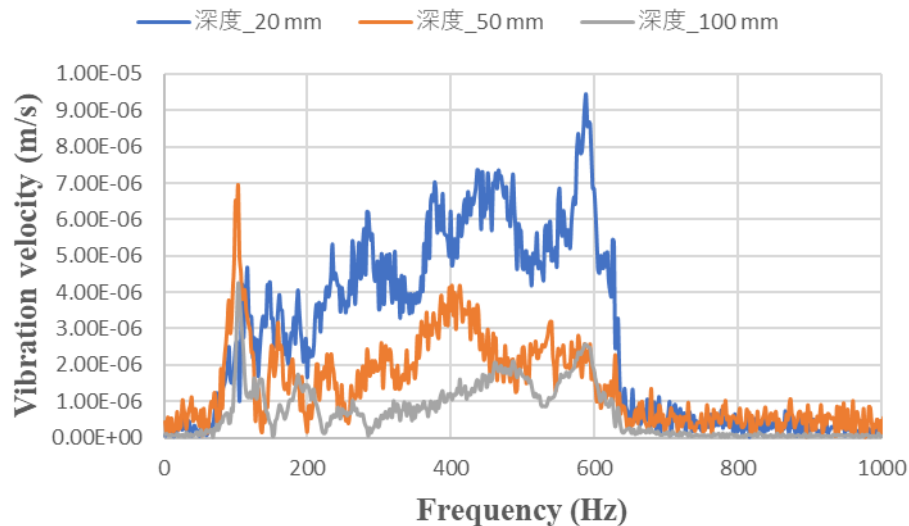


図 3.2.4.29 振動速度スペクトル：埋設深度別

### 3.2.4.3 つくばの埋設物試験場 2 における基礎実験

#### (実験セットアップ)

赤土に埋設された直径 300 mm のポールベースにおいて、埋設深度を変化させた影響について検討を行った。実験風景写真を図 3.2.4.30、ポールベースの埋設位置イメージ図を図 3.2.4.31 に示す。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。図中における括弧内の数値は、計測後に調べた実測値である。実験では計測時間短縮のため、一方向からの計測であったため対象の埋設物により計測距離に差異が存在する。実験時のセットアップを図 3.2.4.32 および図 3.2.4.33 に示す。加振用音源である平面音源はイレクターパイプにより組まれた台の上に固定し、振動計測用のレーザヘッドは供試体の傍らに配置し斜めからの計測が行われた。加振用波形としては、周波数範囲 50-152 Hz のシングルトーンバースト波を使用した。使用波形および波形設定を図 3.2.4.34 に示す。埋設深度別の計測時の設定について表 3.2.4.3 に示す。

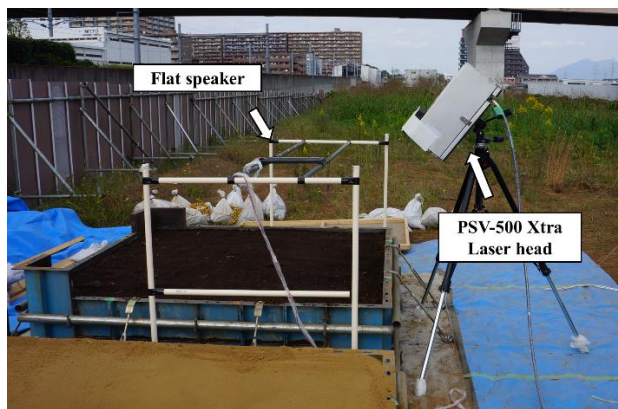


図 3.2.4.30 実験風景写真

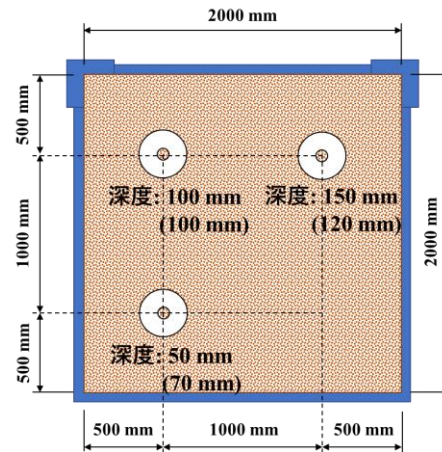


図 3.2.4.31 埋設位置イメージ図

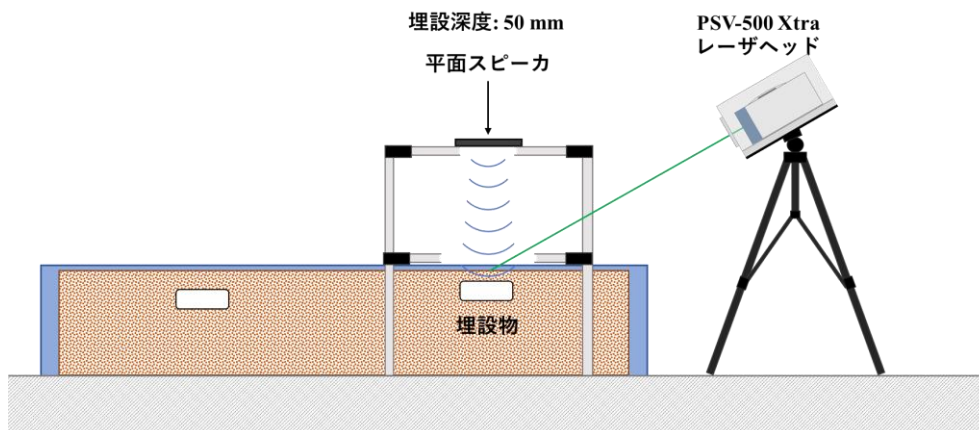


図 3.2.4.32 実験セットアップ図：埋設深度 50 mm

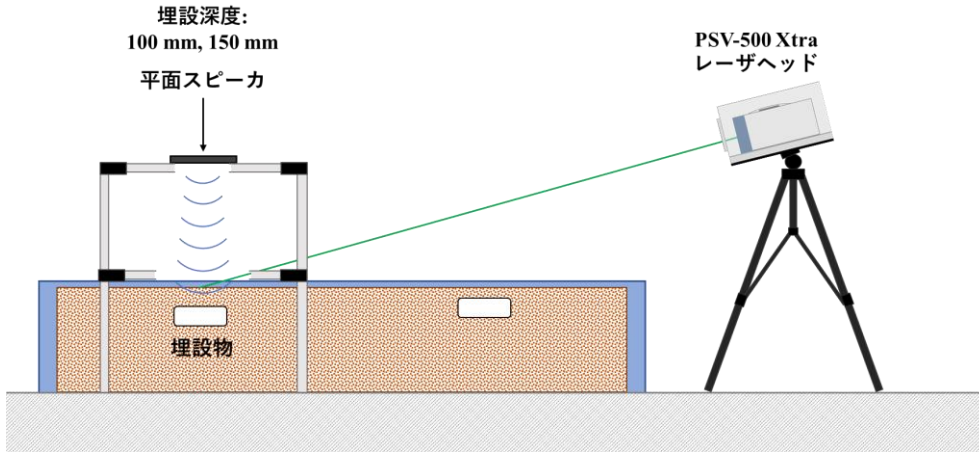
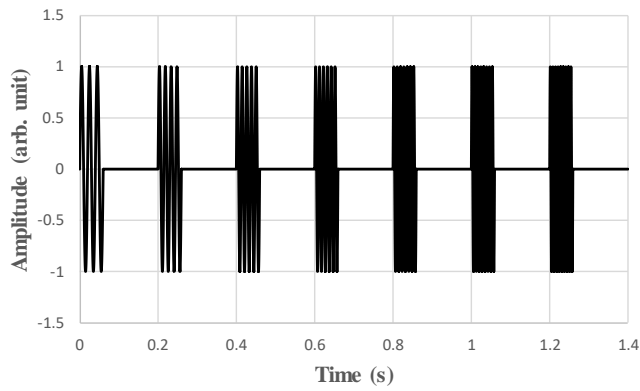


図 3.2.4.33 実験セットアップ図：埋設深度 100 mm, 150 mm



周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.2.4.34 使用波形：シングルトーンバースト波 50-152 Hz

表 3.2.4.35 計測設定

シングルトーンバースト波: 50-152 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm	埋設物無し
レーザ距離 [m]	1.02	1.86	1.97	1.09
音源距離 [m]	0.71	0.71	0.71	0.70
加算平均回数	5	5	5	5
最大音圧 [dB]	99.0	99.0	99.0	99.0
計測ポイント数	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

**(振動エネルギー比分布 : 50-152 Hz)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.35～図 3.2.4.38 に示す。解析時には周波数フィルター(50-152 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm では明確に埋設物が検出されている。100 mm の結果では埋設物上に反応があるが周囲にも同等の反応が存在しており判別が難しい。150 mm の結果でも埋設物状に反応が確認できるが、周囲により強い箇所が存在している。埋設物無しに至っては、大きな反応の塊が複数存在している。これらは、前述したように土の状態が大きく影響していると考えられる。

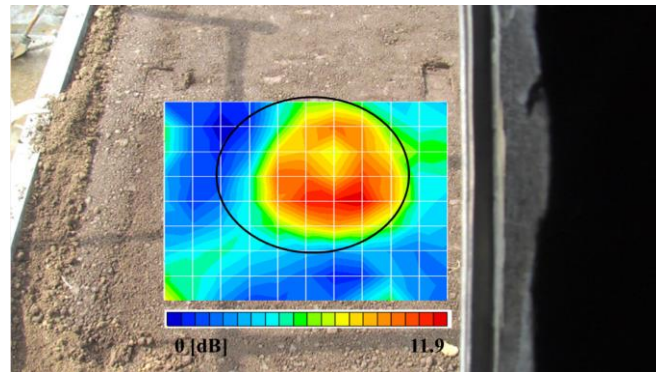


図 3.2.4.35 300mm ポールベースの振動エネルギー比分布,50-152 Hz,埋設深度 50 mm

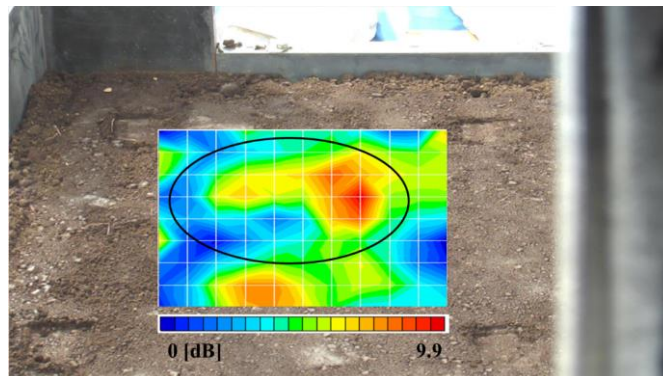


図 3.2.4.36 300mm ポールベースの振動エネルギー比分布,50-152 Hz,埋設深度 100 mm

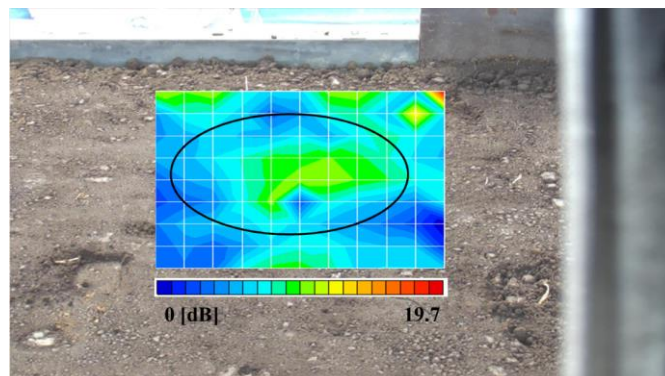


図 3.2.4.37 300mm ポールベースの振動エネルギー比分布,50-152 Hz,埋設深度 150 mm

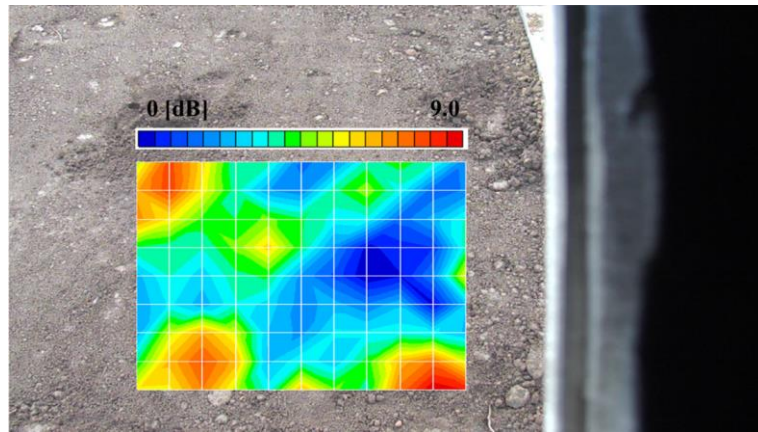


図 3.2.4.38 埋設物無しの場合の振動エネルギー比分布,50-152 Hz

#### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物上の代表点における生データの振動速度波形を図 3.2.4.39、振動速度スペクトルを図 3.2.4.40 に示す。埋設深度 150 mm においても、埋設物の反応である 100 Hz 付近のピークが存在しており、この結果では深い位置まで検出できている。

次に計測点(99ポイント)における全点平均の振動速度波形を図 3.2.4.41、振動速度スペクトルを図 3.2.4.42 に示す。埋設物ありのスペクトルでは、埋設物の反応が変わらずに検出されているが、埋設物無しの振動速度が大きく上昇していることが分かる。これは前述した振動エネルギー比の結果にもある通り、広い範囲でノイズが検出されており、全点平均したことでそれらが混在して値が上昇したことが原因である。

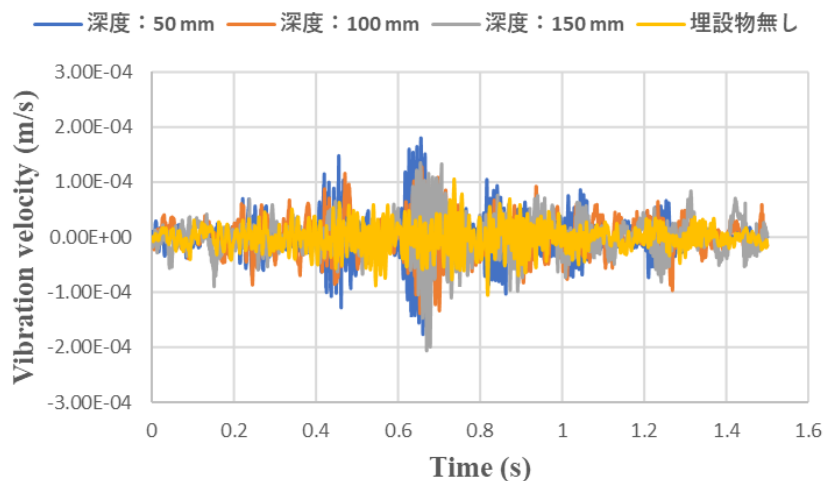


図 3.2.4.39 振動速度波形：代表点、300 mm プラスチックポールベース



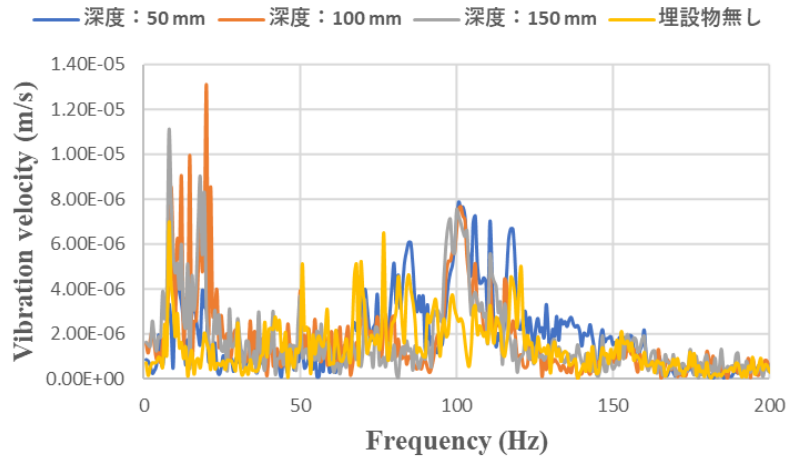


図 3.2.4.40 振動速度スペクトル：代表点、300 mm プラスチックポールベース

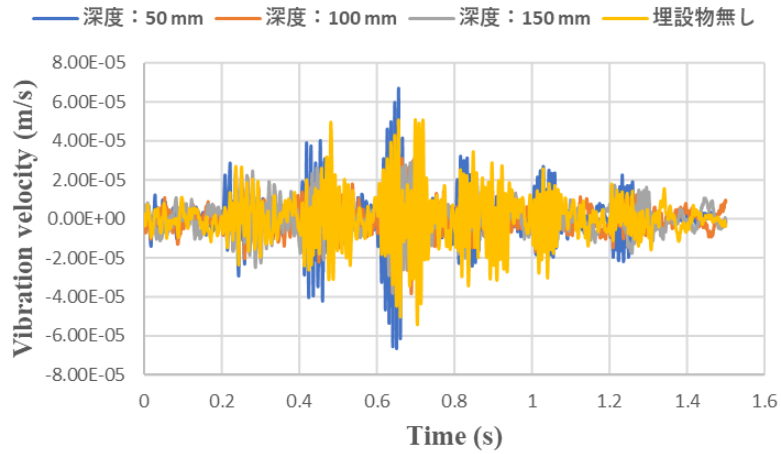


図 3.2.4.41 振動速度波形：全点平均、300 mm プラスチックポールベース

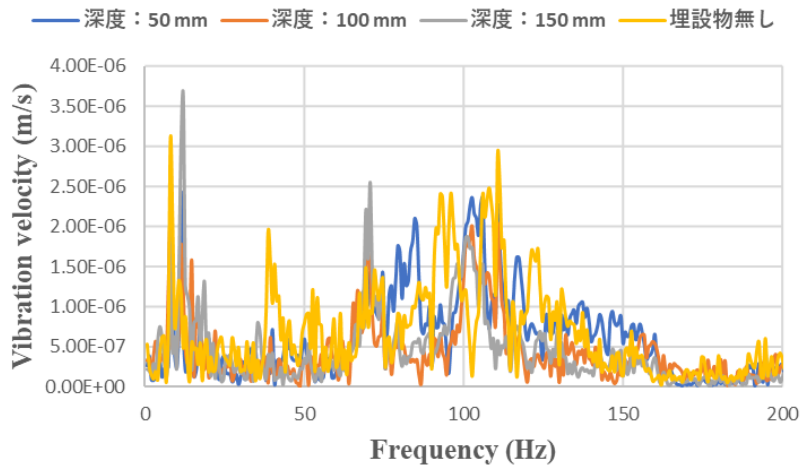


図 3.2.4.42 振動速度スペクトル：全点平均、300 mm プラスチックポールベース

### 3.2.5 まとめ

市販音源(平面音源)を用いた音波照射による地表面振動の計測を、珪砂、関東ローム土、シルト土(つくばの表層土)、赤土(グラウンド土)に対して実施した。最初に珪砂の実験結果から、埋設物を検出する周波数は、埋設物の大きさには反比例するものの、深さを変化させても、あまり変わらないことが明らかになった。そのため、埋設物の深さを細かく変化させて検出周波数がどのように推移するのか実験してみたところ、地表面に近い場所ではたわみ共振に近い周波数で振動するものの、深くなるにつれて減少し、およそ深さ 20 mm 以降はほぼ一定となることが確認された。これは埋設状態における埋設物自体の振動が地表面で観測されていることを意味していると思われる。

つづいて、関東ローム土、シルト土や赤土などを用いた実験を実施した。様々な種類の土壌を用いた実験結果(表 3.2.5.1 参照)から、土壌の種類や状態(含水率や締固度)および音圧にも依存すると思われるが、検出可能な埋設物(中空円形容器の場合)の深さは、直径 300 mm のプラポールベースで約 100~150 mm、直径 180 mm のホーロー容器で約 100 mm および直径 100 mm のホーロー容器で約 50 mm 程度であることが明らかになった。これは、探査可能な深度は、埋設物の直径のおよそ半分程度であることを意味している。

表 3.2.5.1 探査可能な埋設物の深さと大きさ(直径)

		直径 [mm]		
		100	180	300
深さ [mm]	150	○	×××	○△×
	100	○×	○○×	○○○
	50	○△○	○○○	○○○
	20	○		

○珪砂    ○シルト    ○赤土    ○関東ローム

また、関東ローム土を用いた実験では、遠距離からの計測を試み、LDV から埋設物までの距離が約 20 m であっても検出可能であることが明らかになった。ただし、この結果はレーザーヘッドの高さは約 2 m 時の結果であり、使用した LDV (赤外線レーザー 1550 nm, 10 mW) の性能を考えると、仮にレーザーヘッドの高さを約 10 m に設定できれば、土表面へのレーザーの入射角度は 20 m 時と変わらないため、100 m の離隔であっても、20 m 離隔時と同様に検出可能であると思われる。この理由は、距離が増えて、レーザー光の照射面積が増えても、その照射範囲内で最も強い反射光を放つ部分の信号が有効となるため、地表面への入射角が同じであれば、ドップラ効果により計測される振動速度自体には影響がないためである。

なお、今回の研究では、音源自体を UAV に搭載することを想定していたため、主に積載可能重量(ペイロード)の観点から、比較的軽量の平面音源(2.2 kg)を用いた検討を行った。これは UAV に音源を搭載することにより、自在に音源位置を変化させられるメリットの方が大きいと判断したためである。一方で、今回の地中埋設物の検出周波数は、おおよそ 300 Hz 以下と低周波であったため、本来は大型のウーファーを音源として用いるのが音響

学的には望ましい。しかしながら、大型ウーファーとなると重量が重くなりすぎることで、および強力な永久磁石による磁場が UAV の飛行制御に影響を与える可能性が考えられたために、大型ウーファーを用いた検討については実施しなかった。

### 3.3 照射音波波形の最適化による計測速度の改善

#### 3.3.1 計測速度の改善

照射音波の波形は、1 回の照射で 1 つの周波数を使用するシングルトーンバースト波、1 回の照射で複数の周波数を使用するマルチトーンバースト波を非接触音響探査法では考案使用して来た。前節の結果から、直径 100~300 mm 程度の大きさのプラスチック製容器を探査用の埋設物として用いた場合には、探査用の加振波形として、1 kHz 以下、実際には 200~300 Hz 付近以下の周波数帯があれば十分であることが判明している。そのため、比較的狭い範囲の周波数帯域をカバーする波形が良いが、その分、地中内の埋設物を振動させるためにパルス持続時間は長めにとる必要がある。実験で使用したシングルトーンバースト波およびマルチトーンバースト波の例を図 3.3.1.1 に示す。

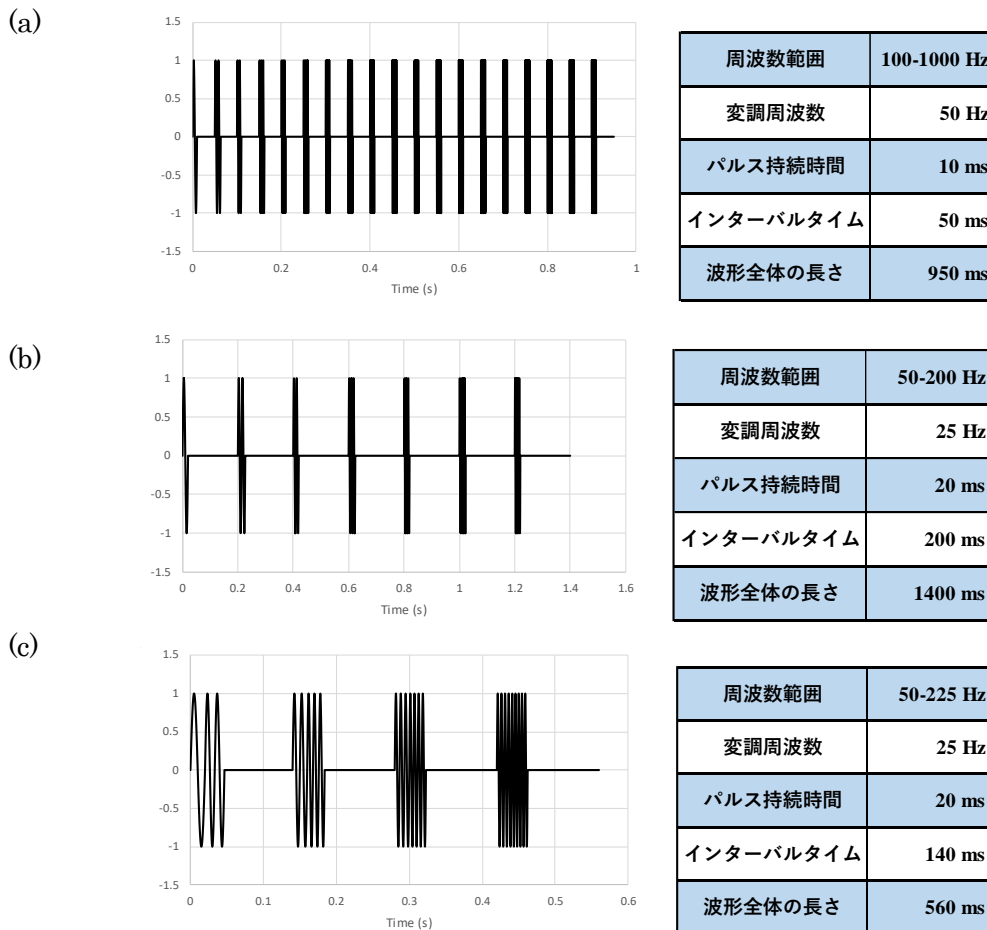
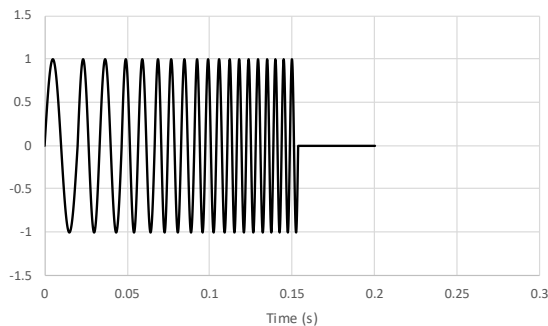


図 3.3.1.1 加振用音波波形例(1)、 (a) シングルトーンバースト波 : 100-1000 Hz, (b) シングルトーンバースト波 : 50-200 Hz, (c) マルチトーンバースト波 : 50-225 Hz

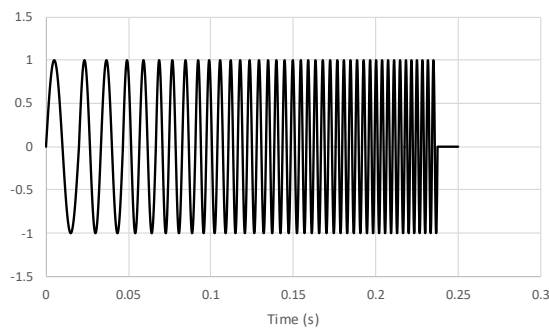
マルチトーンバースト波を使用すれば、シングルトーンバースト波よりも高速な計測が可能になるが、LDV の位置が音源から離れた場合には、反射波による LDV への影響 (LDV ヘッド自体の共振現象) を考慮する必要はなくなるため、バースト波群間のインターバル時間は無くしてしまっても良いことになる。そのため、マルチトーンバースト波のインターバル時間を無くした波形を考案した。波形例を図 3.3.1.2 に示す。このような波形であれば、探査性能 (加振力) を下げることなく、高速な計測が可能である。

(a)



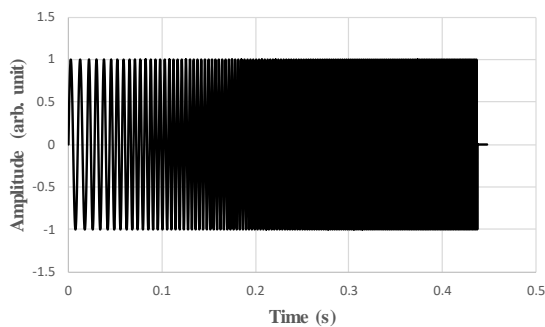
周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	200 ms

(b)



周波数範囲	50-300 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	250 ms
波形全体の長さ	250 ms

(c)



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

図 3.3.1.2 加振用音波波形(2) (a) マルチトーンバースト波 : 50-200 Hz, (b) マルチトーンバースト波 : 50-300 Hz, (c) マルチトーンバースト波 : 100-600 Hz

図 3.3.1.2 に示される加振用音波波形は、高速な計測を実現するために、あえてすべてのバースト波のインターバル時間を取り除いた波形である。一見したところ、チャープ波形に似ているが、実際には加振力を高めるために、各周波数のバースト波のパルス持続時間を長くすることにより、加振力を高める工夫が行われている。

### 3.3.2 埋設物の大きさに応じた周波数と加振力の調整

令和 2 (2020) 年度における非接触音響探査法に用いた、主な使用波形の変遷を表 3.3.2.1 に示す。8/12～13 の実験では直径 100 mm のホーロー容器を対象に実験を行った。使用波形を図 3.3.2.1～図 3.3.2.2 に示す。この時は新たに埋設物を埋め直して対象の共振周波数が不明であるため、100-600 Hz と広めの範囲で加振をして最適な周波数を調査した。その結果 550 Hz 前後に直径 100 mm のホーロー容器の反応が確認されたため、この後は 450-600 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行った。

8/17～18 の実験では直径 180 mm のホーロー容器を対象に実験を行った。使用波形を図 3.3.2.3～図 3.3.2.4 に示す。ここでも、初めに 100-600 Hz の波形を用いて対象の周波数を調査した。その後直径 180 mm のホーロー容器は 100 Hz 辺りに卓越した反応が存在することを確認した。この後は 50-200 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行った。

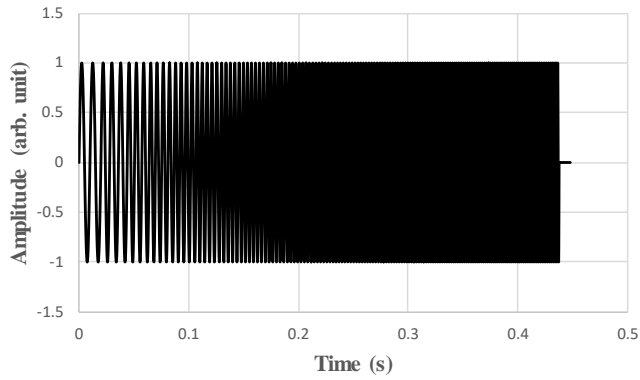
10/12～14 の実験では、直径 300 mm のポールベースを対象に計測を実施した。使用波形を図 3.3.2.5～図 3.3.2.6 に示す。この時はまず初めに 50-200 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行い、100 Hz 前後に埋設物の反応を確認した。その後加振力を上げるため、パルス持続時間を 20 ms から 60 ms に増加させ、計測時間短縮のため周波数範囲を 50-152 Hz に狭めたシングルトーンバースト波を使用して計測を実施した。

10/19～21 および 2/24～26 の実験では、埋設物の周波数範囲が既知であるため 50-152 Hz のシングルトーンバースト波で非接触音響探査法の計測を行った。使用波形を図 3.3.2.7 に示す。

表 3.3.2.1 2020 年度における主な使用波形の変遷

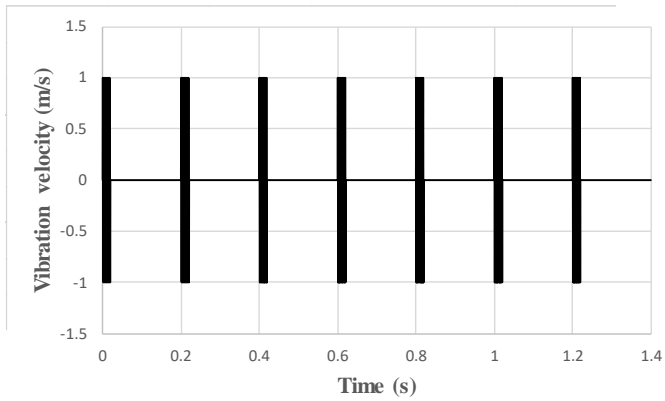
日付	波形	周波数範囲	埋設物種類	埋設物サイズ	土の種類
8/12～13	マルチトーンバースト波	100-600 Hz	ホーロー容器	100 mm	赤土
	シングルトーンバースト波	450-600 Hz			
8/17～18	マルチトーンバースト波	100-600 Hz	ホーロー容器	180 mm	赤土
	シングルトーンバースト波	50-200 Hz			
10/12～14	シングルトーンバースト波	50-200 Hz	ポールベース	300 mm	赤土
		50-152 Hz			関東ローム
10/19～21	シングルトーンバースト波	50-152 Hz	ホーロー容器	180 mm	赤土 関東ローム
2/24～26	シングルトーンバースト波	50-152 Hz	ポールベース	300 mm	赤土

(2020/8/12-13、100 mm ホーロー容器)



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

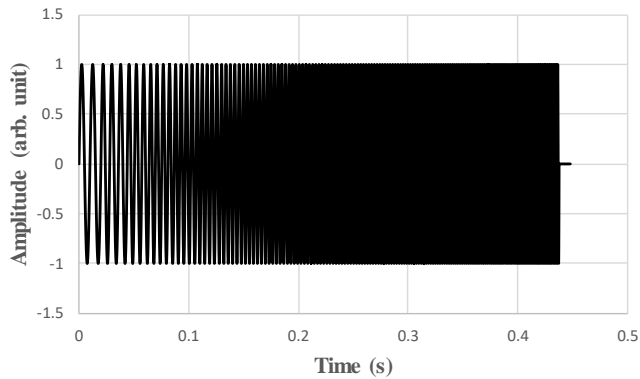
図 3.3.2.1 マルチトーンバースト波：100-600 Hz



周波数範囲	450-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

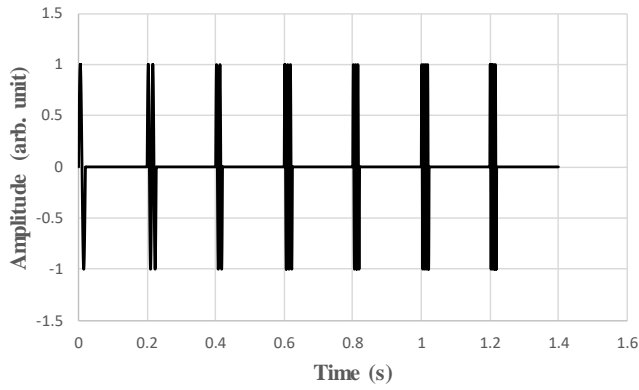
図 3.3.2.2 シングルトーンバースト波：450-600 Hz

2020/8/17-18、180 mm ホーロー容器



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

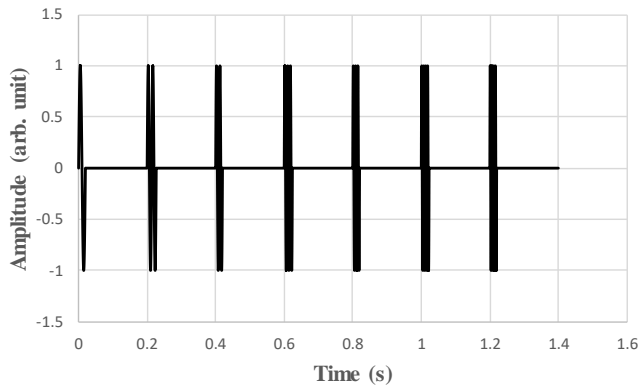
図 3.3.2.3 マルチトーンバースト波：100-600 Hz



周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

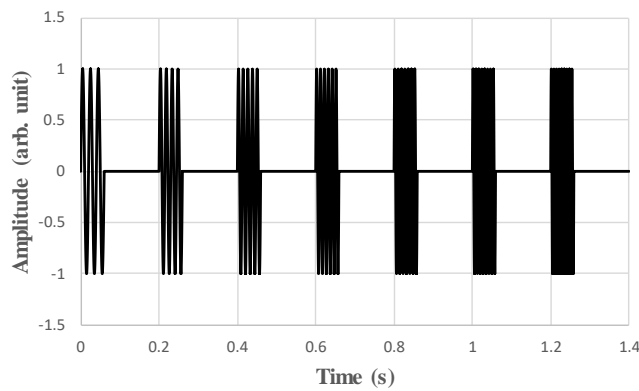
図 3.3.2.4 シングルトーンバースト波：50-200 Hz

2020/10/12-14、300 mm ポールベース



周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.5 シングルトーンバースト波：50-200 Hz

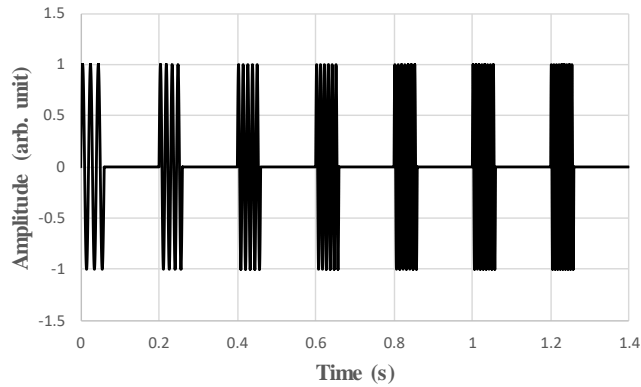


周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.6 シングルトーンバースト波：50-152 Hz

2020/10/19-21、180 mm ホーロー容器

2021/02/24-26、300 mm ポールベース



周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.7 シングルトーンバースト波 : 50-152 Hz

### 3.3.3 加振力の違いが映像結果に及ぼす影響

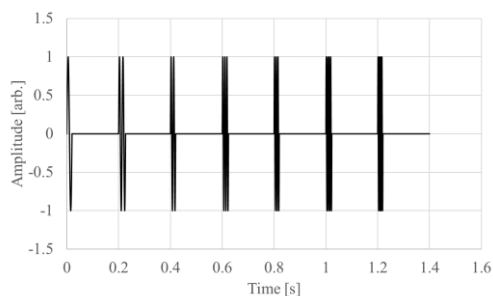
(比較したトーンバースト波)

2020/10/12~14 につくばに埋設物試験場 2 (赤土) にて、深さ 100 mm に埋設した 300 mm ポールベースを非接触で測定を行った。この際、音波のパラメータによる振動エネルギー分布について検討を行った。表 3.3.3.1 に使用したトーンバースト波のパラメータを示す。

表 3.3.3.1

周波数範囲	50-200 Hz	50-152 Hz
変調周波数	25 Hz	17 Hz
パルス持続時間	20 ms	60 ms
インターバルタイム	200 ms	200 ms
波形全体の長さ	1.4 s	1.4 s

(a)



(b)

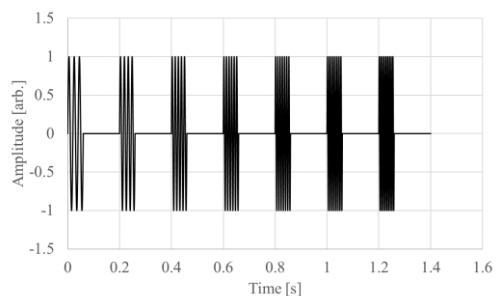


図 3.3.3.1 送信波形例

(a)周波数範囲 : 50-200 Hz、(b) 周波数範囲 : 50-152 Hz



**(実験セットアップ)**

この実験では深さ 100mm に埋設された直径 300 mm のプラポールベースを埋設物として使用した。実験セットアップを図 3.3.3.2 に示す。測定エリア中央から約 1.9 m の位置にレーザドップラ振動計を設置し、音源は測定エリアの直上約 0.7 m にあるものとする。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500 Xtra を使用した。

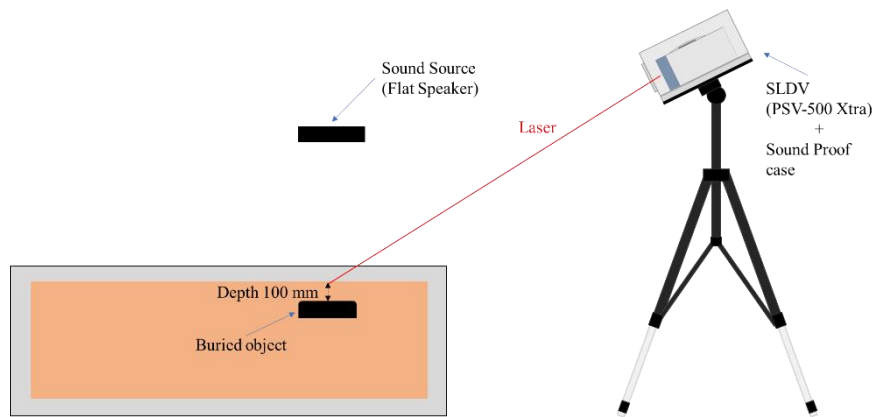


図 3.3.3.2 実験セットアップ図

**(測定結果)**

図 3.3.3.3 に測定エリアを示す。測定点数は 99 点(縦 9×横 11 points)とし、測定点間隔は縦 40.32 mm、横 51.19 mm である。測定エリア中央に直径 300 mm の紙を置き、測定点密度の調整を行った。



図 3.3.3.3 測定エリア

次に振動エネルギー分布を図 3.3.3.4 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域と同じとした。

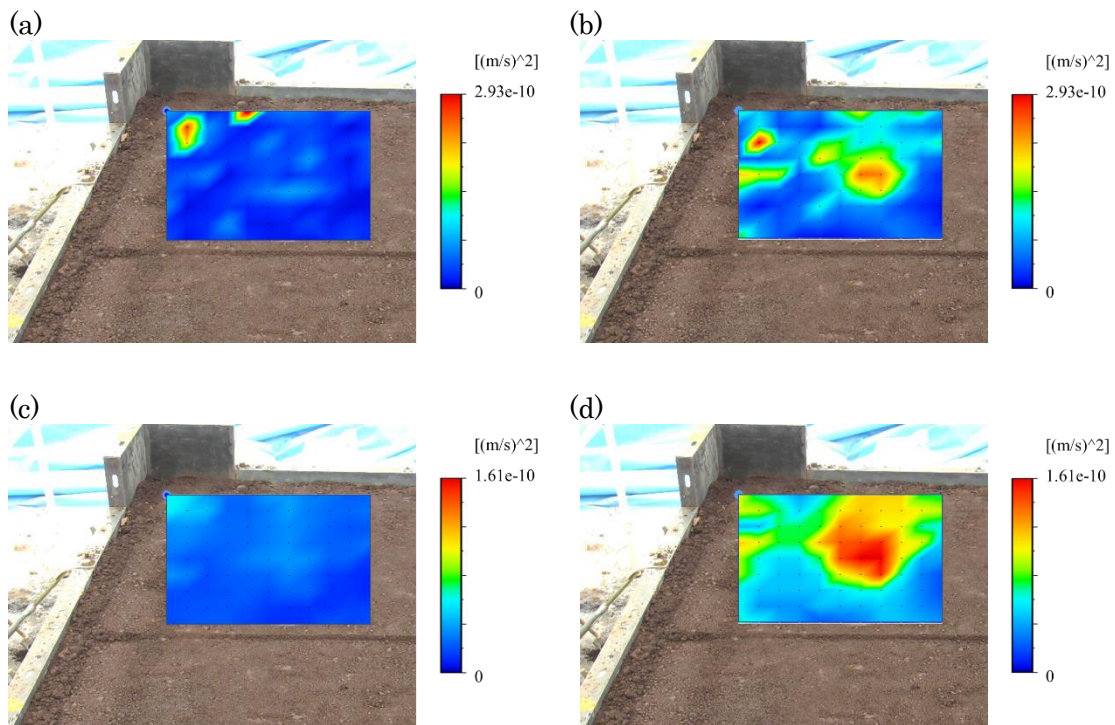


図 3.3.3.4 振動エネルギー分布

- (a)周波数範囲：50-200 Hz、(b) 周波数範囲：50-152 Hz  
 (c)周波数範囲：50-200 Hz、メディアンフィルタ適応後  
 (d)周波数範囲：50-152 Hz、メディアンフィルタ適応後

図 3.3.3.4(b)(d)よりパルス持続時間の長い(60 ms)音波を照射した測定結果は、測定エリア中央付近に振動エネルギーが高い測定点が密集している事が確認出来る。一方、パルス持続時間の短い(20 ms)音波を照射した測定結果は、その傾向が確認出来ない。これは埋設深さ 100 mm の深さに埋まっている物を励振するのに必要な音響エネルギーを満たしていたかどうかの影響したのではと考察する。図 3.3.3.5 に埋設物上の振動速度スペクトルを示す。

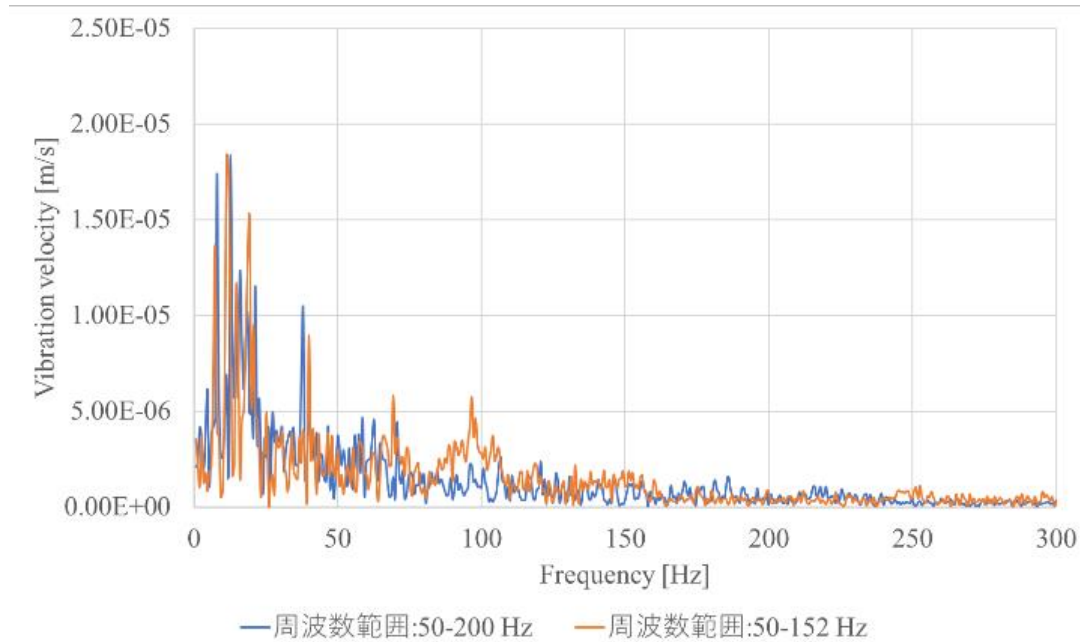


図 3.3.3.5 振動速度スペクトル比較

図 3.3.3.5 よりパルス持続時間が 60 ms 音波を照射した場合(橙線)は 100 Hz 付近にピークがあるが、パルス持続時間が 20 ms の場合はピークが確認出来ない。したがって、深い場所に埋まっている埋設物を探査する場合には相応の音響エネルギーが求められる事が判明した。

### 3.3.4 まとめ

地中探査用の音波照射加振波形については、コンクリート構造物の欠陥探査用のトーンバースト波を基本にして、計測速度を優先したインターバル時間を省略したマルチトーンバースト波、加振力を重視してパルス持続時間が長くしたシングルトーンバースト波が考案された。それぞれの特徴としては、前者は遠距離から高速にスキャンを行いたい場合に適しており、後者は比較的大きめの埋設物（直径 180~300 mm）を明確に検出したい場合に適しているといえる。

### 3.4 UAV を用いた計測システムの構築

#### 3.4.1 試作した音源搭載型 UAV の概要と計測システムの構築

##### (試作した音源搭載型 UAV の概要)

今回試作した音源搭載型 UAV 写真を図 3.4.1.1 に示す。ベースとなる機体は DJI 社の Matrice 600 PRO で、機体下部に平面スピーカー、アンプ、FM 受信機、レーザ距離計および小型の CCD カメラを搭載している。機体の重さは約 10 kg で、飛行可能時間は約 20 分程度である。また、脚部にはカーボン製の着陸脚を装着しているが、これは、UAV を着陸させて計測する場合に、地表面から音源までの距離をとることにより、LDV による地表面の面的な計測を容易にするためである。

なお、この機体には RTK (Real-Time Kinematics) が搭載されている。この RTK とは正式には RTK-GNSS (Real-Time Kinematics - Global Navigation Satellite System) と呼ばれるもので、地上等に設置した「基準局」からの位置情報データによって、高い精度の測位を実現する技術である。位置情報を送る衛星システムに依存しているため、衛星電波が届かないところでは使用できないという欠点があるものの、上空に障害物の無い場所では、GPS のみを使用した場合と比べると UAV の位置精度が格段に向上させることができる。



図 3.4.1.1 地中探査用に試作された音源搭載型 UAV の写真(2019 年 12 月 16 日)

### (UAV を用いた計測システムの構築について)

UAV を用いた計測システムの概要を図 3.4.1.2 に示す。本計測では、UAV からの音波照射加振を LDV のある基地局側から、波形も含めてすべて無線制御し、かつ LDV による計測と完全に同期させる必要がある。照射加振に用いる波形はトーンバースト波と呼ばれる特殊な波形であり、任意波形発生器により発生することができる。その波形を UAV 側に伝送する方法として、今回は FM 送受信機を採用している。理由は遠距離でも安定した送受信が保てることと、および Bluetooth のような遅延時間がほとんど発生しないため、LDV 側との同期計測に適していることが挙げられる。LDV 側の計測と UAV 側の音波照射加振の同期は、任意波形発生器により行うことができる。この時、無線電波およびレーザー光の伝搬速度は音波の伝搬速度に比べると圧倒的に早いため、UAV と LDV の距離が離れても遅延時間はほぼ無視することが可能である。波形変更や音圧調整も任意波形発生器により行うことができるため、LDV のある基地局側から音波に関する調整はほぼすべて実施可能である。

また、計測する地表面が観測できるように UAV 搭載の CCD カメラは平面音源よりも外側に取り付けられており、真下の映像を UAV 操縦者が確認できるようになっている。UAV の音源から地表面までの距離は、UAV に取り付けられたレーザ距離計（レーザレンジファインダ）により計測することができる。これは当初、別途 PC に表示するようになっていたが、UAV 操縦者が距離を把握しにくいと、令和 2 年 7 月に距離表示ユニットを別途作製して頂いている。

地表面での音圧は、送信波形毎に騒音計で確認しているが、音源と地表面の高さが分かれば、任意波形発生器側の電圧調整で対応可能である。

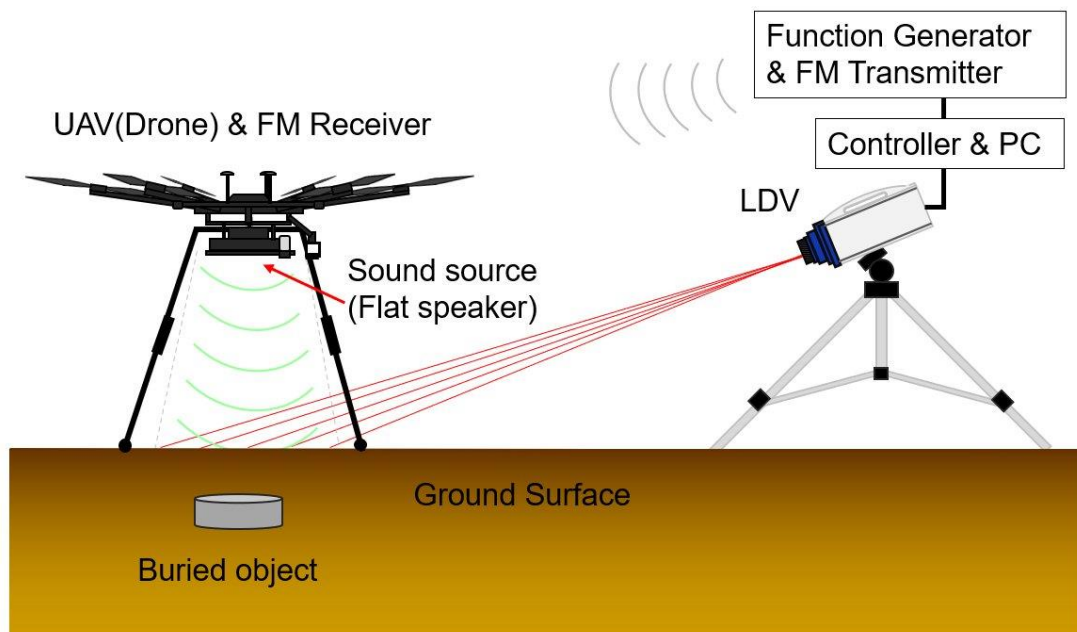


図 3.4.1.2 UAV を用いた計測システムの概要

### 3.4.2 UAV の改良と検証

#### 3.4.2.1 UAV の防振設計について

##### (問題点)

音源を搭載した UAV を使った非接触音響探査では、UAV の使用場面は 2 つに大別される。一つは、飛行しながら音を照射するもので、壁などの垂直面を検査対象とする。もう一つは、狙った場所まで飛行したあと着地して、その周りの地面など水平面を検査対象として照射する。後者の場合、飛行に使うバッテリーを節約し、その分、長めの計測にまわせるという長所がある。

防振が必要となるのは後者の場合である。図 3.4.2.1 に示すように、地面に向けて平面音源から一様な探査用の音(a)を放射するが、これと同時に音源自体の振動(b)が UAV の着陸装置（以下'脚部'と記す）を経由し接地面に伝わってしまう。音源の発する平面音波(a)を加振力にして埋設物を探査する本手法にとって、脚部を経由し地面に伝わる振動(b)は、探査対象である地面に局所的な擾乱(ノイズ)を与えることになり、測定精度を低下させるため、可能な限り遮断する必要がある。

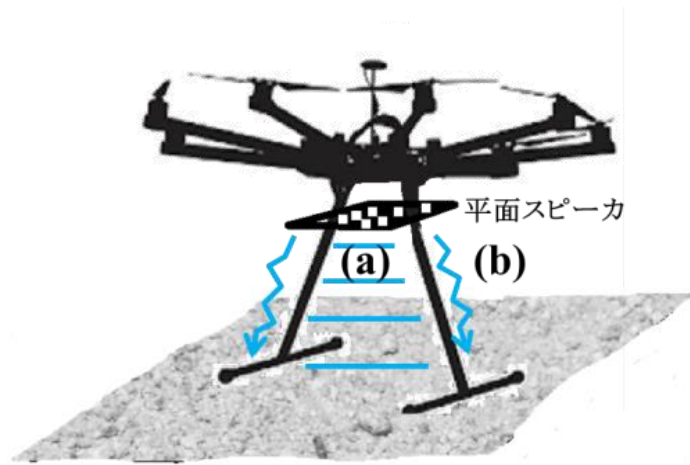


図 3.4.2.1 探査用音波(a)と脚部経由の振動伝播(b)

##### (遮断量の目標)

脚部から接地面への振動の遮断を検討する。音源搭載 UAV は新構造であり、遮断量として相場値もないため、現状に対し、 $-40 \text{ dB}$  ( $=1/100$ ), at  $50 \text{ Hz}$  と仮置きした。 $50 \text{ Hz}$  は音源の放射特性の低周波における実用的な適用下限で、出せる音量が限られ、S/N 比の確保が難しいことからノイズ低減を最も必要とする周波数である。 $40 \text{ dB}$  は、1つの目安とした“2桁低減 ( $=1/100$ )”である。

##### (具体的遮断設計の案)

遮断案としては、質量(増加)、バネ(低下)が考えられるが、UAV の飛行性能の負担となる質量増量は除外した。図 3.4.2.2 にはバネによる対策 3 案を示す。

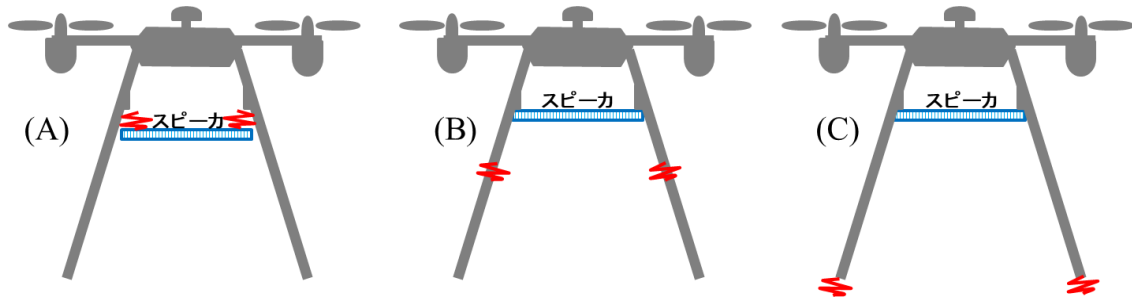


図 3.4.2.2 (A)音源バネ懸架 (B)脚部へのバネ挿入 (C)脚部下部へのバネ装着

各案とも一長一短があるが、(B),(C)案にて 40 dB の遮断を得るためには、それぞれ部材の軸方向剛性、接地面剛性を大幅（例；2.3 N/mm 以下≒台所用スポンジ（3M 製 Scotch Brite™ 115×72×30 mm<sup>3</sup>に、1 脚当たりの分担荷重である 2.5kg 重(=24.5N)をかけたときの測定結果）のバネを脚部 4 隅に配し、UAV 総質量を 10 kg と仮定）に低減する必要がある。しかし、これによって脚部の座屈性（折れ曲がり）、接地時のドローンの安定性（ぐらつき）、泥付きによるバネ定数の劣化などが必至で、補償は容易でない。一方、(A)案は、起振源（音源）に近い上流対策で、効果的かつコンパクトに実現できる可能性があるため、この案を採用することとした。

#### (UAV 脚部の改良案)

図 3.4.1.1 に示すように音源搭載型 UAV の脚部は、着陸時の計測を想定して、カーボン製の 4 本脚が装着されていた。しかしながら、UAV 着陸時には、搭載音源の振動が、この脚部を通じて、地面に伝搬することがあることが明らかになった。そのため、音源の高さを変更せずに、着陸脚の構造を変更することにより、脚部からの振動伝搬を低減すると同時に、計測エリアの拡大を行った。具体的には、図 3.4.2.3 に示すように UAV 本体に最初から付属している 2 本の着陸脚を延長して接地場所を音源直下から離すと同時に、4 本脚をやめて、2 本の棒もしくは四角い棒を設置面に取り付けて、UAV 本体の荷重が分散するようにした。



図 3.4.2.3 音源搭載型 UAV の着陸脚の構造の変更

### (改良後の UAV の着陸脚)

改良後の UAV 着陸脚の状態がわかる写真を図 3.4.2.4 に示す。カーボン製の四角い枠(約 920 mm 角)を接地部とすることにより、脚部の強度を保ちつつ、スキャン領域の拡大が達成できていることがわかる。



図 3.4.2.4 音源搭載型 UAV の着陸脚(2021 年 1 月 25 日)

### 3.4.2.2 改良後の検証評価

#### (防振量の目標)

音源搭載 UAV は新機構であり、防振量の相場もないが、開発のため現状に対し、-40 dB (=1/100), at 50 Hz と仮置きした。50 Hz は UAV に搭載された平面音源の放射特性における低周波側の適用下限で、出せる音量が限られ、S/N 比の確保が難しいことからノイズ低減を最も必要とする周波数である。40 dB は 1 つの目安で“2 桁低減 (=1/100)”を意味している。

#### (台上実験法)

図 3.4.2.1 の振動伝播成分(b)に対する防振量の改善度をインパクト加振によって評価する。定量値として以下を使った。

$$\text{脚部振動(m/sec) } V \quad / \quad \text{音源への振動入力(Newton) } F$$

この物理量は、振動入力(F)と、伝搬先における振動速度(V)との比であり、比  $V/F$  が低いほど優れた防振といえる。次元は  $V/F = \text{モビリティ(m/(Newton*sec))}$  で、伝達モビリティである。本実験では、防振機構の有りと、無しとの 2 仕様でこの物理量を測定し、その差分により防振効果を評価した。

図 3.4.2.5 に実験セットアップを示す。UAV は頑丈な実験台の上に置いている。また、実



験時は、室内の空調も止めるなどノイズとなりうる音、振動を可能な限り抑えるべく配慮した。



図 3.4.2.5 台上実験 a)入力(F) b)出力(V)

(a)は入力部で、音源の中央部をインパルスハンマーで面直方向に打撃する。入力(F)はインパルスハンマーの先端に内蔵された力計で計測される。一方、出力は、脚部下端のバーの中央部(b)の上下方向振動速度(V)で代表し、LDVにより計測した。

図 3.4.2.6 に入力信号と出力信号の具体例を示す。精度を確保するため、ハンマーによる打撃は 10 回以上を目安とした。

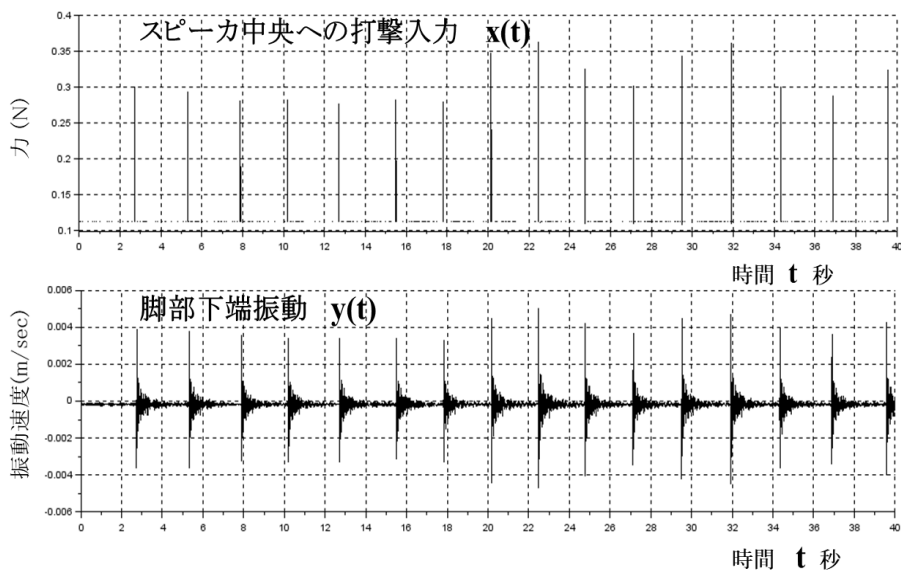


図 3.4.2.6 ハンマーによる打撃力(入力)と、脚部下端の振動(出力)の時系列波形

この例は防振構造のない仕様で行ったものであるが、約 2 秒間隔で 16 回ほど打撃してい

る。インパルス状の打撃入力  $x(t)$  に対して、脚部下端では減衰する波形  $y(t)$  となっていることがわかる。

#### (防振 (伝達モビリティによる) の計算)

振動伝達は、入力  $x(t)$  のフーリエ  $X(f)$  と、出力  $y(t)$  のフーリエ  $Y(f)$  の比をとり、伝達モビリティ  $H=X(f)/Y(f)$  で算出する。10 回以上の試行に対し平均処理を行うため、計算手法としては、(3.4.2.4)式で計算されるクロススペクトル法を使った。ここで  $i$  は、試行回である。上述のように試行総数は 10 回以上としたが、実際は、5~6 回程度で十分な精度が確保されている。

$$|H|^2 = \frac{|E(X_i^* Y_i)|^2}{|E(|X_i|^2)|^2} \quad \dots (3.4.2.4)$$

#### (実験結果)

##### 1) 実験精度の限界値の見極め：出力部の振動から

伝達モビリティ  $H$  を計算する前に、実験精度の限界値を見極める上で、実験で得られた脚部振動 (出力) のスペクトルを、入力を入れていない状態での振動レベル (以下、暗振動レベル) と比較して図 3.4.2.7 に示す。

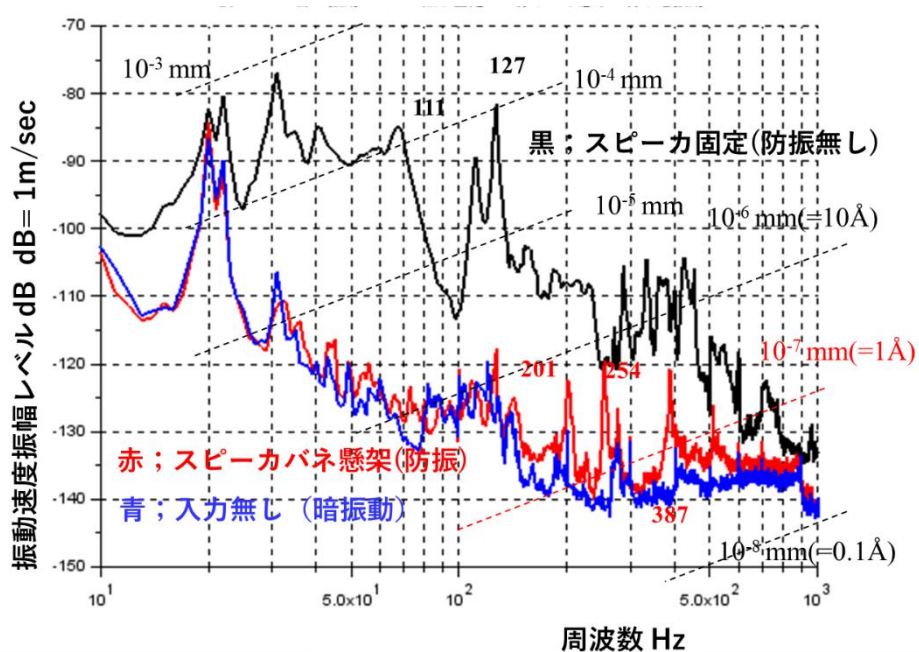


図 3.4.2.7 脚部下端振動のスペクトル(暗振動との比較)

図より、音源固定(防振無し)に対して、音源をバネで懸架した今回の防振構造の場合、50 Hz 以上で最大 30 dB 程度の防振効果が確認できる。ただし、防振効果の正確な値は、試行回毎にインパクト力にばらつきがあるため、入力値で正規化する (すなわち 伝達関数  $H$

で評価をする) 必要があり、処理結果はこの後に述べる。 図 3.4.2.7 で注目すべき点は防振構造をとることによって、広い周波数域で脚部下端の振動はほぼ暗振動のレベルまで低減していることである。すなわち、防振構造により、脚部下端振動はこの実験セットアップで検出できる最小の振動レベルまで達したといえる。換言すれば、前報で示した計算では、本防振構造により 50 Hz 以上で 40 dB 以上の効果が得られたが、実験では暗振動のため、50 dB の効果を得ることはないが、それでも最大の効果が得られていることを示している。

ここで、暗振動レベルは、100 Hz を例にとれば、図 3.4.2.7 から、振動速度は $-125$  dB( $0$  dB =  $1$  m/sec) =  $5.6 \times 10^{-7}$  m/sec、あるいは振動振幅は  $10^{-6}$  mm ( $10$  Å) と極めて小さいレベルである。本実験では UAV を、ゴムマットを敷いた実験台の上に設置しているが、この  $10^{-6}$  mm の暗振動レベルは、実験棟自体の振動(例; 耳で感知できないものの、レベル他の部屋での活動、空調など、)、あるいは、空気中の微細な音波 (ノイズ) などにより、脚部が励振されたものと推測している。

### (防振の評価)

防振の良否は伝達モビリティ  $H$  で評価する。前節で記したように、 $H$  は脚部下端振動のレベルを入力値で正規化することで求める。図 3.4.2.8 は図 3.4.2.7 に示した脚部下端振動を入力で正規化した伝達モビリティである。図 3.4.2.8 の全体の形状は図 3.4.2.7 と極めて似ているが、これは入力の周波数特性が広い周波数域でほぼ一定値であったことによる(すなわち、入力が極めて鋭いインパルス状で実験できたこと)。この図から、防振無し(黒線)と防振有り(音源のバネ懸架)では広い周波数域で、20~30 dB と大きな防振が得られていることが確認できる。

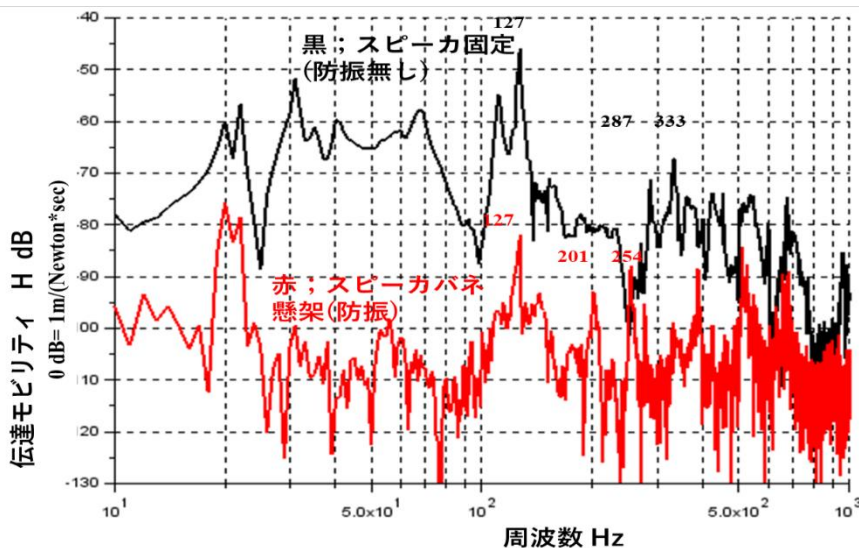


図 3.4.2.8 脚部下端への振動伝達量の比較

防振量として数値化するため、図 3.4.2.8 の防振無しと、防振有りの dB の差分を取り、これを図 3.4.2.9 として示した。図中、0 dB に線(緑)を引いたが、この線より上が防振とな

る。上述のように、広い周波数域で、20～30 dBの防振が得られていることがわかる。

また、この図から、254 Hzの極めて狭い周波数で、防振の劣化領域、すなわち、通過周波数(pass frequency)域が認められる。これは音源を4隅で懸架するコイルバネのサージングと呼ばれるバネ内部の共振によるもので、バネ懸架という防振構造にしたことによる跳ね返りといえる。サージングは狭い周波数域のみでおき、実用的には許容されるものと考えているが、音響探査において、探査の対象物の共振が250 Hzに近い場合は、その影響はありうる。この場合、バネは線径0.5 mm、外形5 mm、長さ30 mmと微小なこともあり、バネの周りに薄いゴム膜を巻くことでサージングは抑えられることが分かっている。フィールドでの実機稼働時に必要であればこの対応をとりたい。

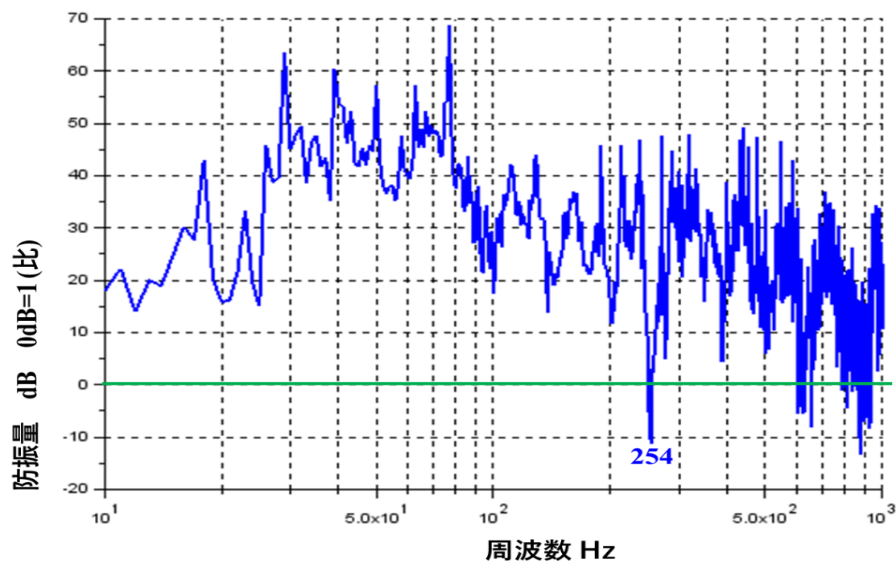


図 3.4.2.9 図 3.4.2.8 からの防振量算出

#### (まとめ)

音源マウント部と脚部の改良が行われた音源搭載が UAV を用いた台上加振実験を実施した。その結果、地面近傍の脚部下端にて、暗振動レベルまで振動が遮断でき、想定された防振効果がえられていることを確認した。

#### 3.4.3 まとめ

UAV 着陸時の計測を考慮して、試作した音源搭載型 UAV の機体には、最初からカーボン製の 4 本の着陸脚が取り付けられていた。実際に着陸状態で計測してみると、音源の振動が、着陸脚から地面に伝搬していることが明らかになった。音源単体を空中に配置した場合には、明確に得られていた埋設物の映像に影響があることが明らかになったために、音源自体の UAV への搭載(マウント)方法および着陸脚自体の改良が検討された。研究室内における振動計測の結果から、音源マウントの改良効果は十分であることが明らかになった。

### 3.5 構築した計測システムを用いた埋設物試験場での計測

#### 3.5.1 UAV 飛行時の基礎実験

##### 3.5.1.1 厚木の埋設物試験場における基礎実験

###### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/02/04 の厚木市にある佐藤工業(株)技術研究所の埋設物試験場(土壌はつくばの表層土(シルト)を使用)において測定されたものである。埋設物は直径18cmのホーロー容器とし、埋設深さは土壌表面から約50mmとした。実験セットアップを図3.5.1.1に示す。埋設物の直上の約1mに音源搭載型UAV(DJI社Matrice 600 PROを外注改造したもの)を飛行させ、埋設物から約2mの離隔でレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計はPSV-500Xtra(Polytec Japan Corp.)を使用した。送信音波としてはマルチトーンバースト波を用い、地表面付近の音圧は約93~96dB程度とした。

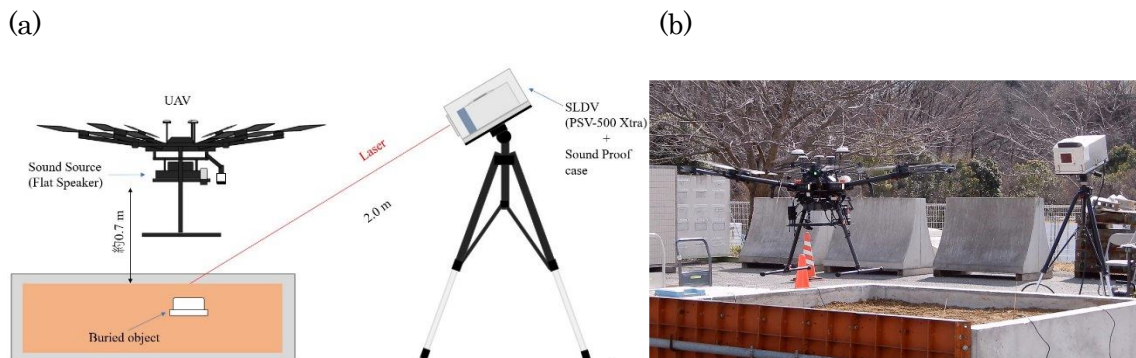


図 3.5.1.1 厚木の佐藤工業(株)技術研究所における実験セットアップ図

(a) 実験セットアップ図、(b)実験時の写真

###### (実験結果例1・・・音源固定時)

比較用に、音源を台に固定(地表面からの高さ約700mm)した場合の探査例を示す。図3.5.1.2は深さ50mmに埋設した180mmホーロー容器計測時のスキャンエリアである。

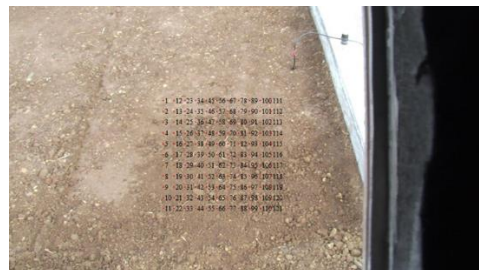


図 3.5.1.2 スキャンエリア図 (11×11=121 points)

計測点数は121(=11×11)ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピー

の分布図を図 3.5.1.3 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.5.1.4 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のシングルトーンバースト波を用いた。音圧は約 94 dB である。データの加算平均は行っていない（実験例 2 および実験例 3 も同様）。

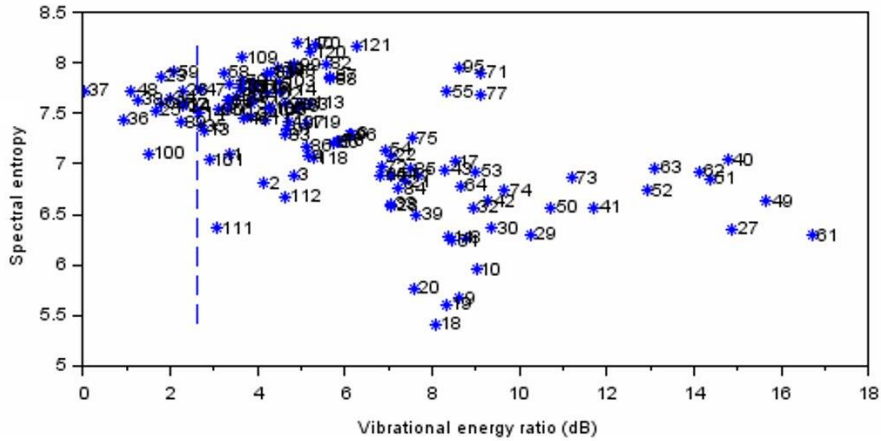


図 3.5.1.3 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

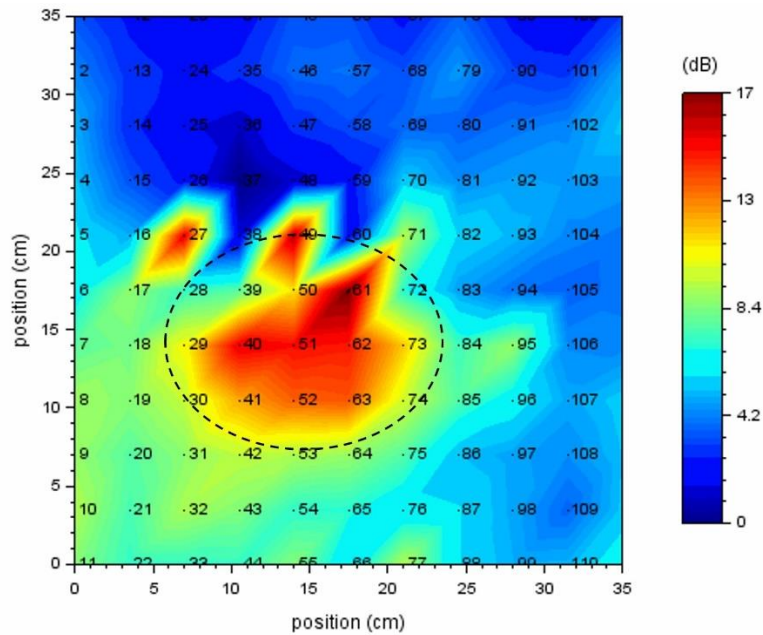


図 3.5.1.4 振動エネルギー比による映像結果例

音源固定時には、ほぼ明瞭に埋設物が捉えられていることが分かる。  
（黒破線円は埋設物の想定位置を示している。）

(実験結果例 2・・・ UAV 飛行時 1)

次に UAV 飛行時の音波照射時の結果例を示す。図 3.5.1.5 は深さ 50 mm に埋設した 180 mm ホーロー容器計測時のスキャンエリアである。



図 3.5.1.5 スキャンエリア図 (11×11=121points)

計測点数は 121 (=11×11) ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.5.1.6 に、振動エネルギー比分布図を図 3.5.1.7 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用いた。音圧は約 93 dB である。

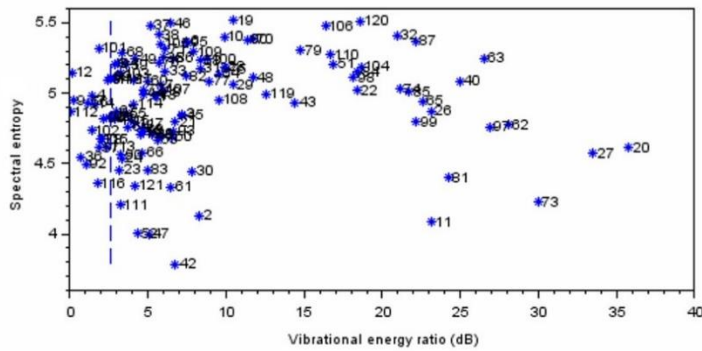


図 3.5.1.6 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

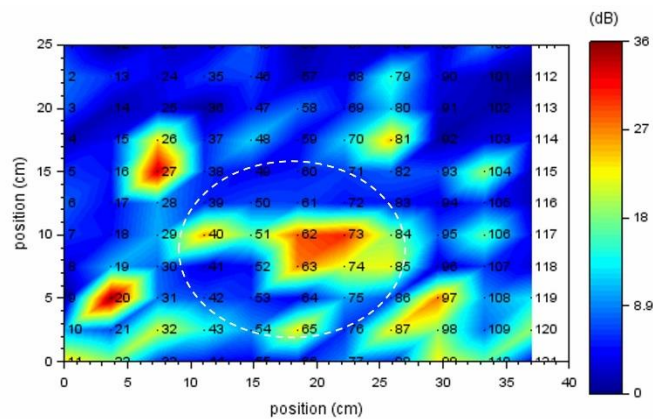


図 3.5.1.7 振動エネルギー比による映像結果例

埋設物の反応も入っているものの飛行時にはロータ風の影響で、周囲のノイズも発生していることが分かる (白破線円は埋設物の想定位置を示す)。

(実験結果例 3・・・UAV 飛行時 2)

同じ場所で再度、UAV を飛行させて音波照射させた場合の結果例を示す。図 3.5.1.8 は深さ 50 mm に埋設した 180 mm ホーロー容器計測時のスキャンエリアである。



図 3.5.1.8 スキャンエリア図 (11×11=121points)

計測点数は 121 (=11×11) ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.5.1.9 に、振動エネルギー比分布図を図 3.5.1.10 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用いた。音圧は約 93 dB である。

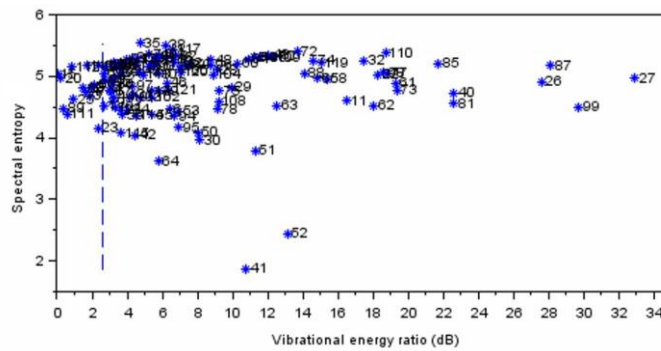


図 3.5.1.9 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

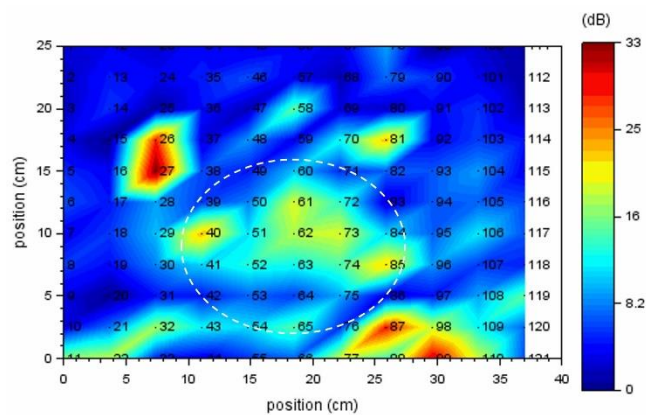


図 3.5.1.10 振動エネルギー比による映像結果例

前回同様に、埋設物の反応も入っているものの飛行時にはペラの影響で、周囲にもノイズが発生していることが分かる（白破線円は埋設物の想定位置を示す）。



#### (実験結果例 4・・・UAV 飛行時 3 FFT ドメイン)

同様な実験を、S/N 比改善のために SLDV 側データ取得を TIME ドメインから FFT ドメインに切り替えて 5 回アベレージにして再度実施した。図 3.5.1.11 は計測時のスキャンエリアである。計測点数は 121 (=11×11) ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.5.1.12 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.5.1.13 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用いた。音圧は約 93 dB である。



図 3.5.1.11 スキャンエリア図 (11×11=121points)

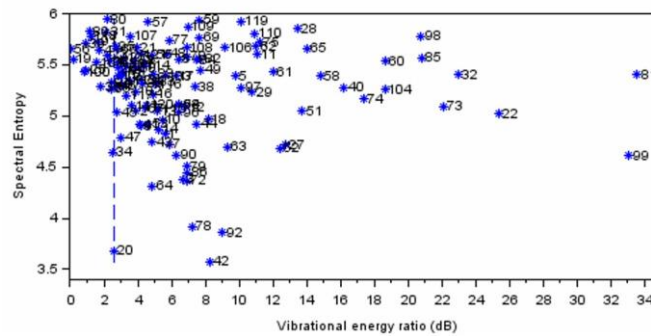


図 3.5.1.12 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

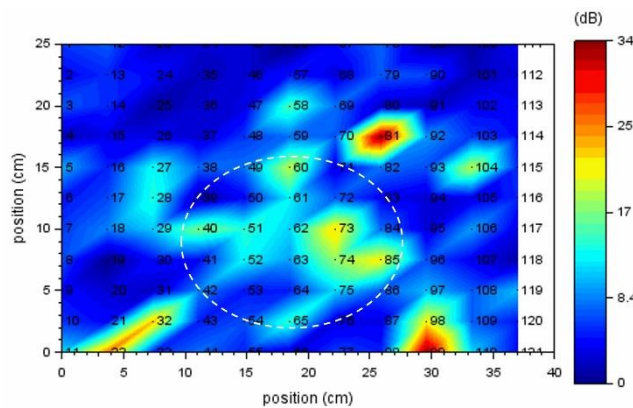


図 3.5.1.13 振動エネルギー比による映像結果例

5 回アベレージをかけても、全体的な印象は変わらないことがわかる。これは飛行時のロータによる影響により、揺れやすい小石等は常に振動していることが考えられる。

## (振動速度スペクトル比較)

実験結果例 1~4 における欠陥部および健全部の振動速度スペクトルの比較結果を図 3.5.1.14~図 3.5.1.17 に示す。各実験の計測設定を表 3.5.1.1 に示す (STNB および MTNB はシングルトーンバーストおよびマルチトーンバースト波の略称)。各図中における青色の線は埋設物上、橙色の線は埋設物が無い場所の結果である。これらを比べると、音源固定時は欠陥における一次の共振と思われる周波数帯を中心として、大きな反応が検出されている。しかし、UAV 飛行時の結果では埋設物の振動も検出されてはいるが、他の周波数帯でも大きな反応が検出されており、埋設物の反応が埋もれる形になっている。

表 3.5.1.1 各実験の計測設定

	加振波形	周波数範囲 (Hz)	計測状況	加算平均回数	データ取得モード
実験結果例 1	STNB	50-300	音源固定	5	Time
実験結果例 2	MTNB	50-300	UAV飛行	1	Time
実験結果例 3	MTNB	50-300	UAV飛行	1	Time
実験結果例 4	MTNB	50-300	UAV飛行	5	FFT

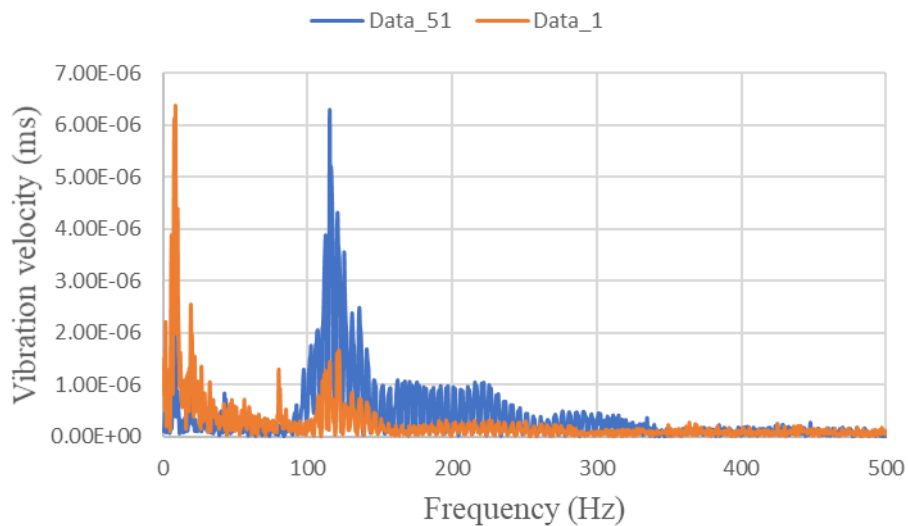


図 3.5.1.14 実験結果例 1 音源固定時 STNB

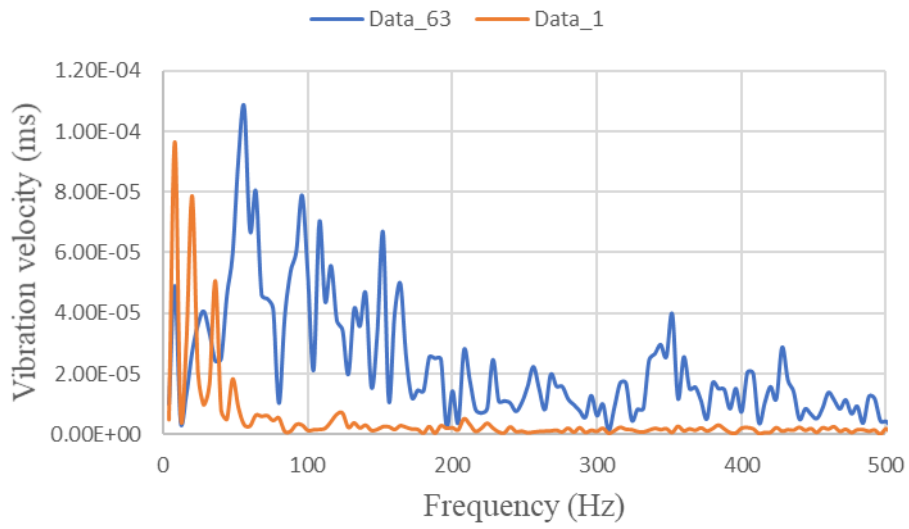


図 3.5.1.15 実験結果例 2 UAV 飛行時 MTNB

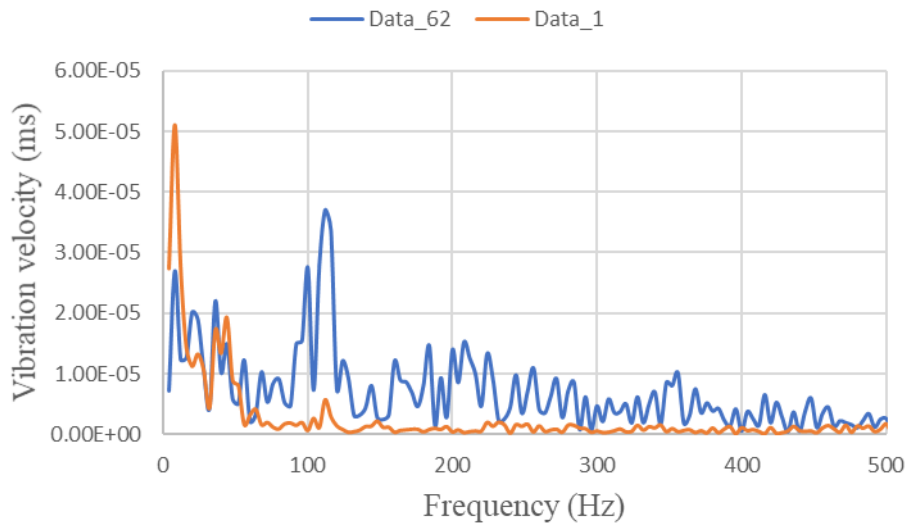


図 3.5.1.16 実験結果例 3 UAV 飛行時 MTNB

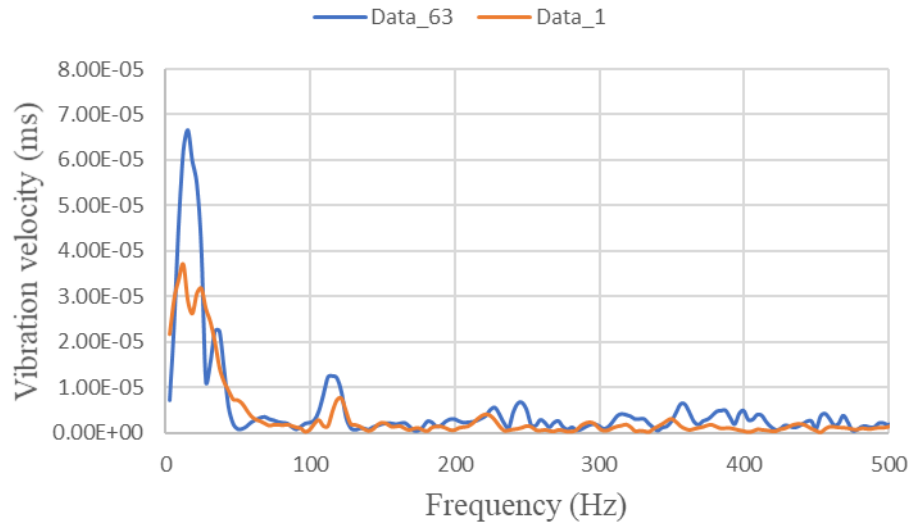


図 3.5.1.17 実験結果例 4 UAV 飛行時 FFT ドメイン MTNB

(まとめ)

厚木の佐藤工業(株)技術研究所の埋設物試験場(土壌はつくばの造成地の表層土(シルト))において、飛行中の UAV からの音波照射加振による直径 180 mm のホーロー容器(深さ 50 mm)を用いた探査実験を実施した。実験結果から、音源を固定した場合と比べると、埋設物の反応も得られているものの、周囲にノイズが発生してしまうことが判明した。これは、低空に滞空する UAV のロータからの風が直接、真下にある土壌面に当たることにより、地表面にある揺れやすい小石等も常時揺れてしまっていることが原因であると推測される。

これは UAV のロータからの風が原因であるので、計測時にはあえて滞空せずに、いったん着陸してロータの回転数を抑えた状態で計測することなどが対策として考えられる。

### 3.5.1.2 つくばの埋設物試験場 1 における基礎実験

#### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/03/06 のつくば市にある造成地において測定されたものである(土壌はつくばの表層土(シルト))。埋設物は直径 300 mm の中空プラポールベースとし、埋設深さは土壌表面から約 50 mm とした。実験セットアップを図 3.5.1.18 に示す。埋設物の直上の約 0.7~1 m 程度に音源搭載型 UAV を飛行させ、埋設物から約 4.1 m の離隔でレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra (Polytec Japan Corp.) を使用した。送信音波としては 100-600 Hz のマルチトーンバースト波を用い、音源から距離約 1 m の音圧を約 100 dB 程度とした。

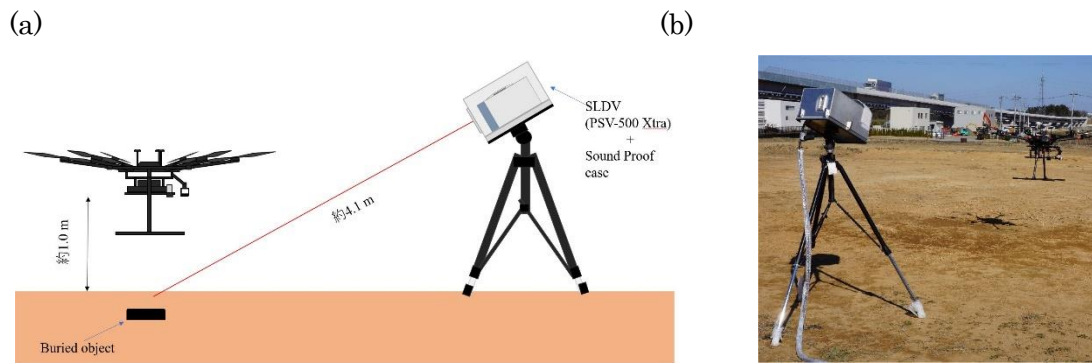


図 3.5.1.18 つくば市の造成地における UAV 飛行実験セットアップ図

(a) 実験セットアップ図、(b)実験時の写真

深さ 50 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.5.1.19 に示す。

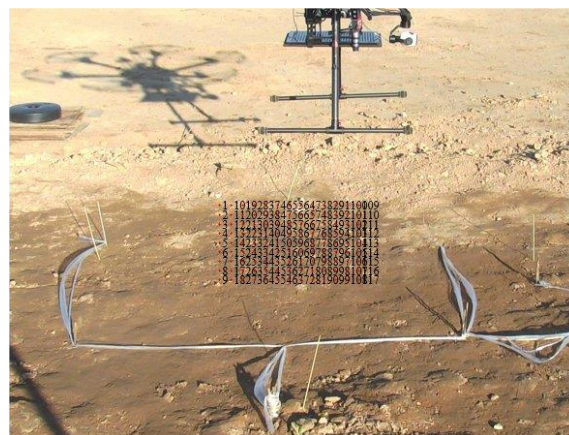


図 3.5.1.19 スキャンエリア図 (9×13=117points)

この場所では、周囲に障害物が無く、UAV の飛行には最適な場所であったが、同時に風を遮るものがほとんどないため、時折吹く強風により機体が大きく流されてしまうことがあった。そのため、風が弱まった瞬間を狙った高速計測を 5 回行って、後で振動エネルギー値の平均をとることとした。計測結果例を図 3.5.1.20～3.5.1.24 に示す。

(実験結果例 1)

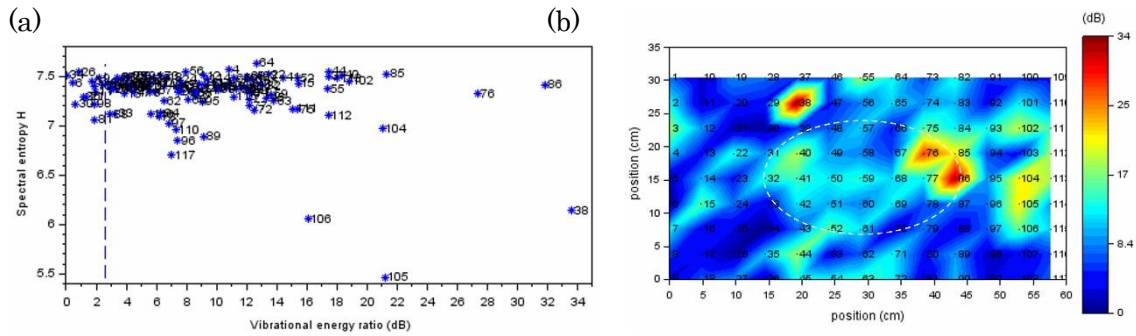


図 3.5.1.20 実験結果 1

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 2)

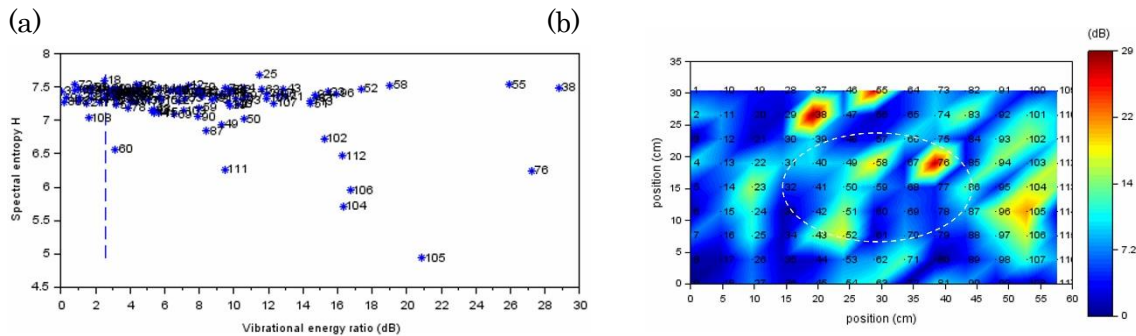


図 3.5.1.21 実験結果 2

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 3)

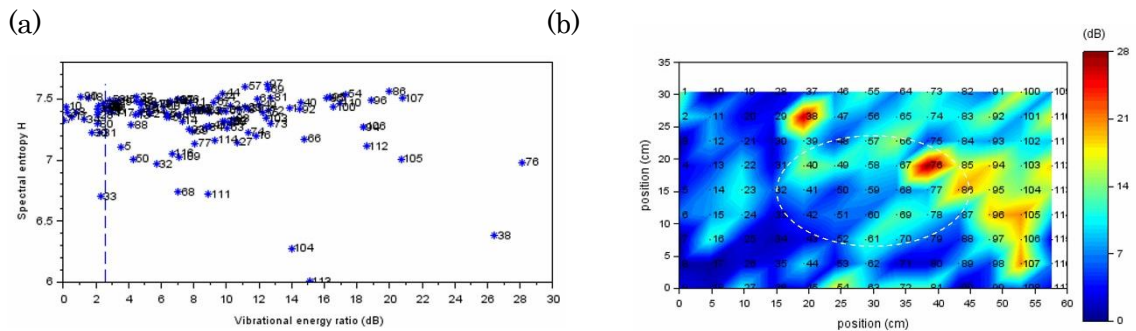


図 3.5.1.22 実験結果 3

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 4)

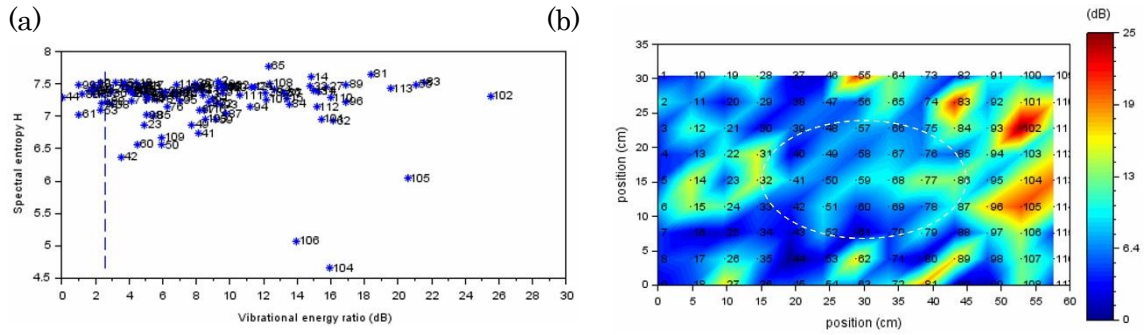


図 3.5.1.23 実験結果 4

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 5)

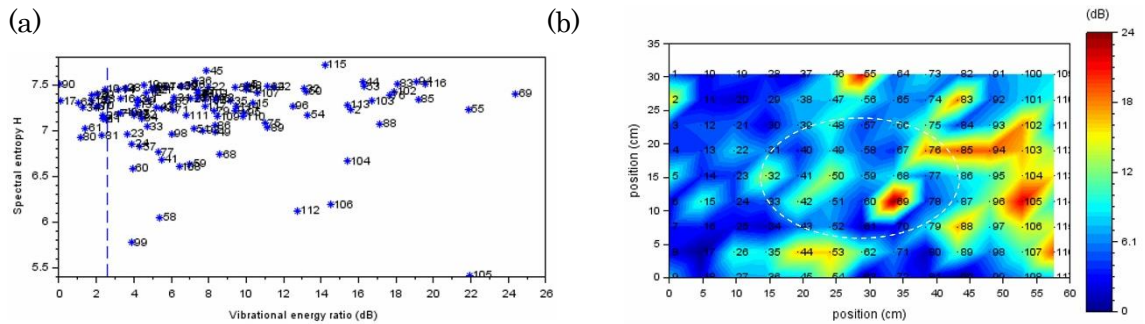


図 3.5.1.24 実験結果 5

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 6・・・5 回分の平均)

上記 5 回分の計測結果より得られた振動エネルギーの平均値を用いて振動エネルギー比分布図を描いた場合の結果例を図 3.5.1.25 に示す (黒破線円は想定埋設位置)。

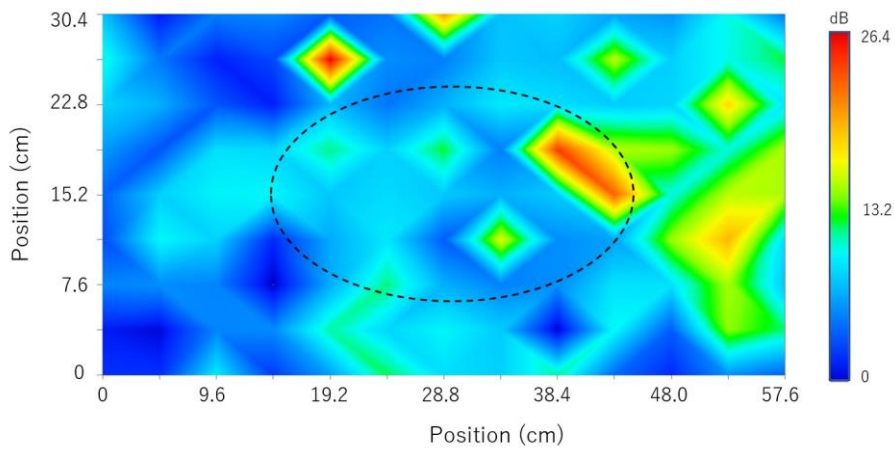
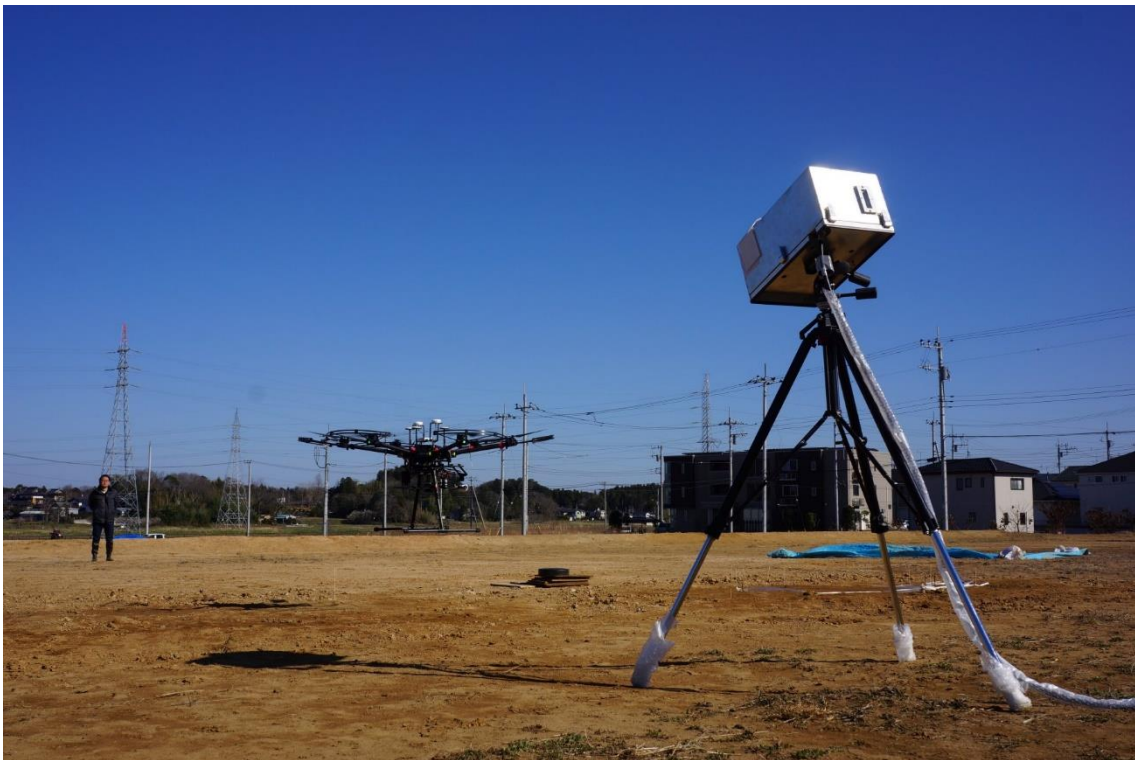


図 3.5.1.25 5 回分の振動エネルギー平均値より得られた振動エネルギー比分布図

図より、埋設物の反応も含まれているようであるが、真下に吹き付けるロータ風による影響により発生するノイズの影響が無視できないことがわかる。180 mm のホーロー容器の時も同様であったが、音源固定時には問題なく検出できていたことを考え合わせると、このロータ風による影響の低減方法を将来的には検討する必要があると思われる。

#### (まとめ)

UAV を飛行させながら音波照射加振を加えた場合の実験結果から、現状では、ロータからの風の影響により、浅層埋設物の反応が明瞭に得られない場合があることが判明した。地表面に存在する揺れやすい小石等と、地中内の埋設物の振動は時間的には分離できる可能性があるものの、以降の実験では、UAV は着陸状態で計測することとした。着陸状態による計測であったとしても、音源位置を自由に変更できるという利点は失われておらず、むしろ、音源位置の変動が無くなるために計測結果が安定するほか、バッテリーの消耗も少なくなるために、広範囲の探査には適していると思われる。



(実験時参考写真 B:つくば市の埋設物試験場 1 における UAV 飛行実験,2020 年 3 月 6 日)



### 3.5.2 UAV 着陸時の基礎実験

#### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/02/18 の佐藤工業(厚木)の埋設物試験場で測定されたものである。ただし、土壌としてはつくばの造成地における表層土(シルト)を用いている。埋設物は直径 180 mm のホーロー容器とし、埋設した深さは土壌表面から約 20 mm, 50 mm とした。実験セットアップを図 3.5.2.1 に示す。埋設物の直上の約 0.75 m に音源を設置し、約 1.5 m にレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra を使用した。また、測定前には、土の上に板と砂利を詰めた袋を置いて加圧を行っている(約  $2 \times 1 \text{ m}^2$  のコンパネ板 2 枚に、土嚢袋  $5 \text{ kg} \times 24$  個を乗せた)。

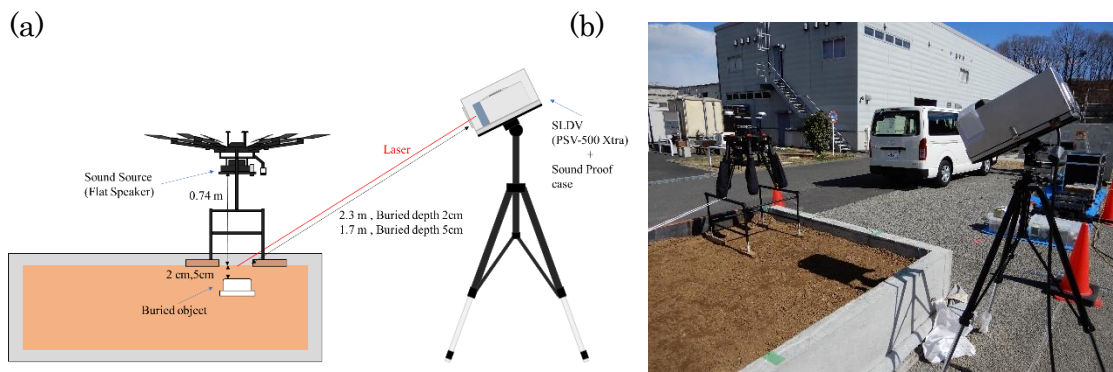


図 3.5.2.1 実験セットアップ

(a)実験セットアップ図、(b)実験風景

測定に使用した音波はマルチトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100~600 Hz、変調周波数 25 Hz、パルス幅 20 ms、波形の長さは 448 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 103 dB である。図 3.5.2.2 に波形例を示す

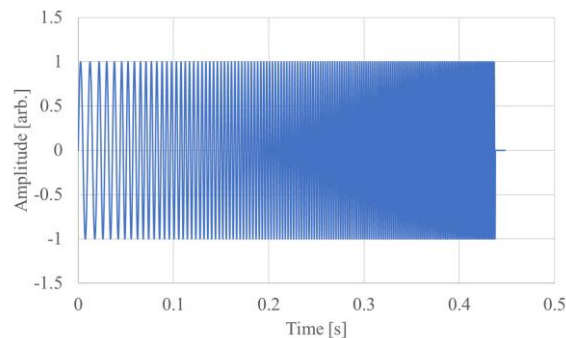


図 3.5.2.2 送信波形例

また、図 3.5.2.3 に測定エリアを示し、表 3.5.2.1 に測定点数と測定点間隔を示す。

(a)



(b)



図 3.5.2.3 測定エリア

(a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

表 3.5.2.1 測定点数と測定点間隔

Buried depth [cm]	Measurement Points	Distance between measurement points	
		Horizontal [cm]	Vertical [cm]
2	117 (9×13)	2.1	1.1
5	117 (9×13)	3	1.5

## (実験結果・・・直径 100 mm ホーロー容器)

図 3.5.2.4 に振動エネルギー分布を示す。積分範囲は 50~300 Hz であり、照射音波の帯域と同じ帯域とした。カラースケールは各測定場所の最大最小値となっている。

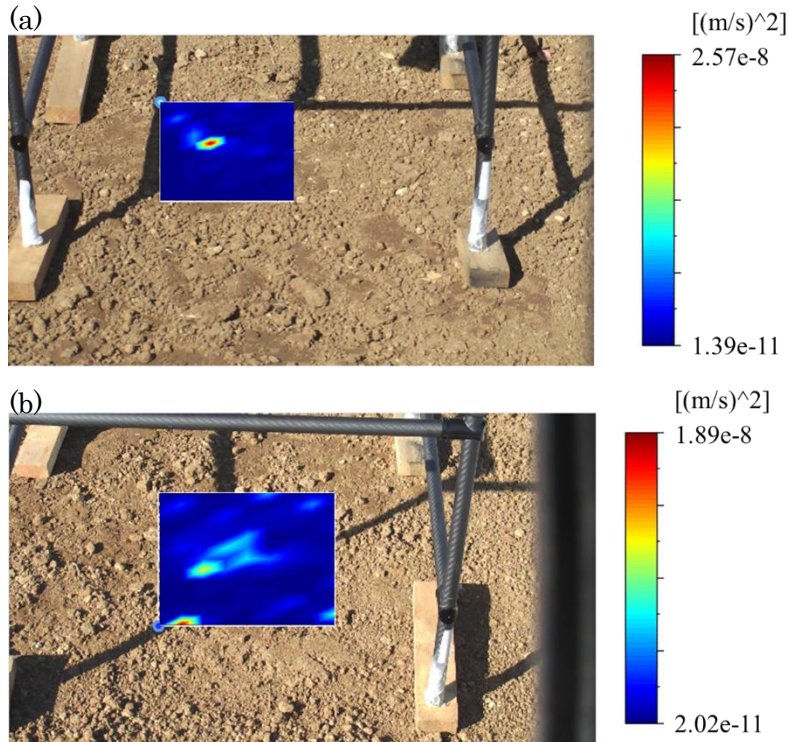


図 3.5.2.4 振動エネルギー分布  
(a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

図 3.5.2.4 より埋設深さ 20 mm と 50 mm の振動エネルギー分布中に突出して高い値を示す測定点がある。埋設深さ 50 mm は中心付近に埋設物と思われる分布があるため、メディアアンフィルタ処理後の結果を図 3.5.2.5 に示す。

図 3.5.2.5 より、埋設深さ 20 mm と 50 mm とともに振動エネルギー分布の中心付近に周囲より振動エネルギーの値が高く、それらの測定点が隣接・密集している事が確認出来る。次に、埋設深さ毎の振動エネルギーを比較したグラフを図 3.5.2.6 に示す。

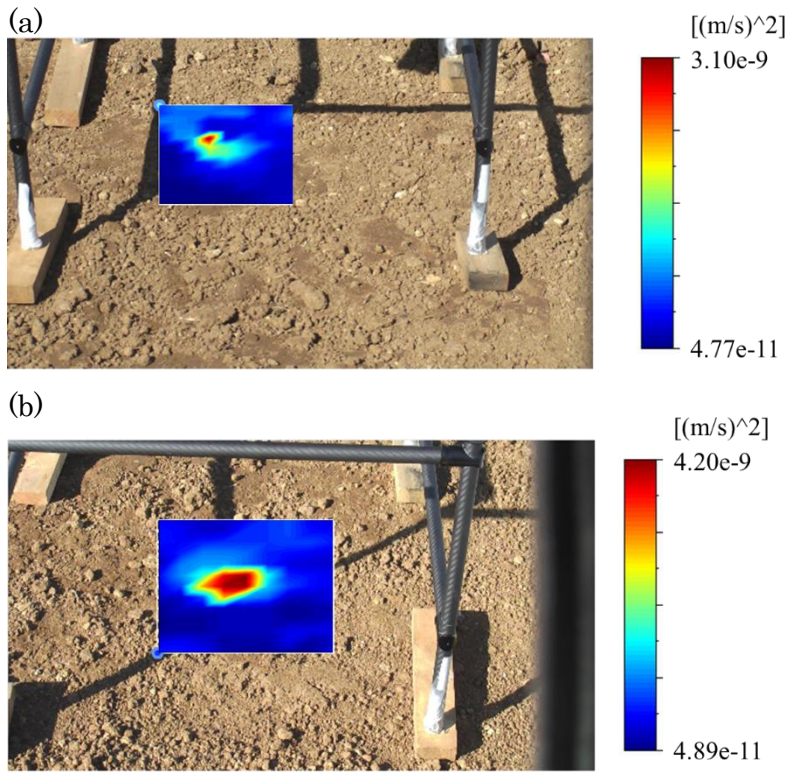


図 3.5.2.5 振動エネルギー分布(メディアンフィルタ適応後)  
 (a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

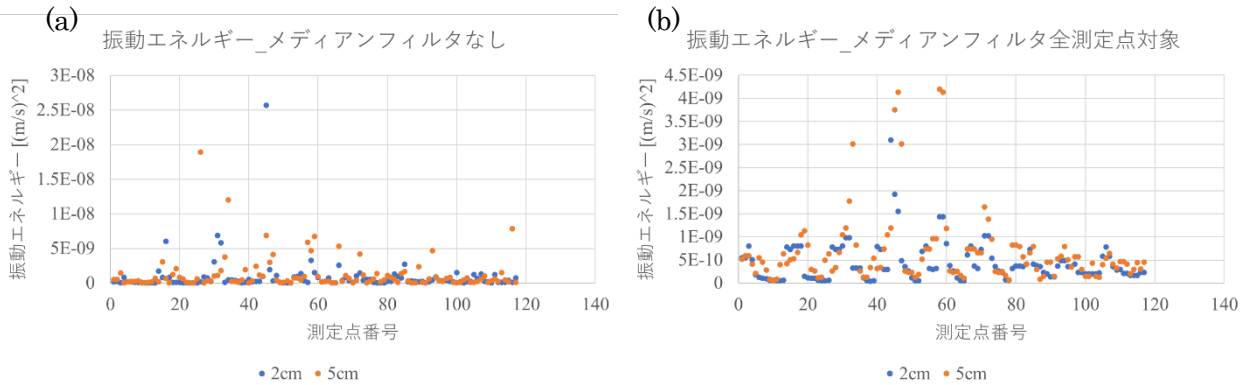


図 3.5.2.6 振動エネルギー比較  
 (a)メディアンフィルタなし、(b)メディアンフィルタ適応後

図 3.5.2.6 より、埋設物上ではない測定点の振動エネルギーの値が約  $1.5e-9 (m/s)^2$  以下に集中している事が確認出来る。埋設深さ 2cm,5cm とともに  $1.5e-9 (m/s)^2$  以上の値を示す測定点が多数あることから、検出が出来る可能性はあると思われる。次に、図 3.5.2.5 の埋設深さ毎の振動エネルギー分布のカラースケールの最大最小値を同じ値にした結果を図 3.5.2.7 に示す。

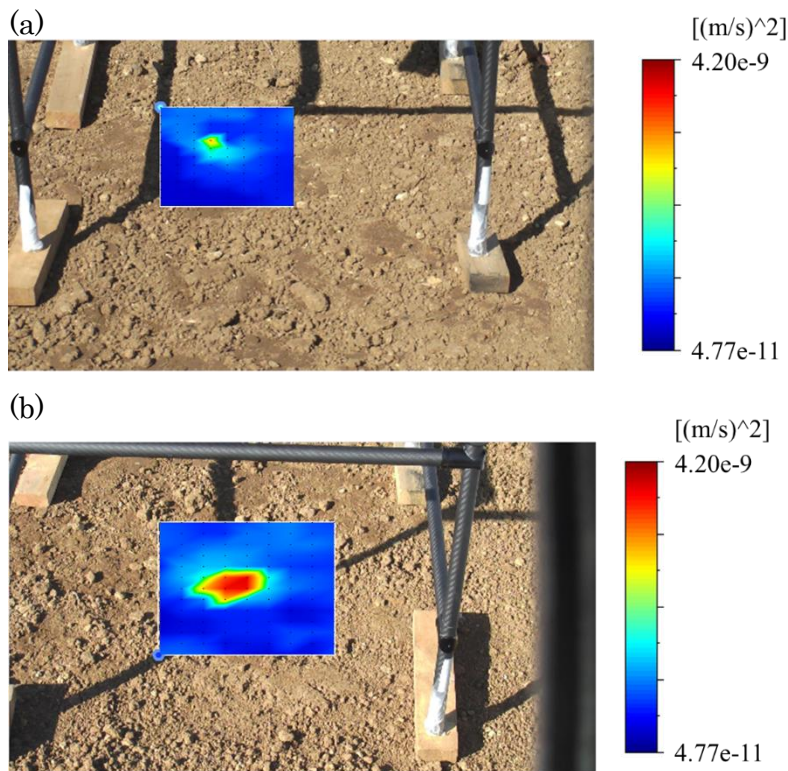


図 3.5.2.7 メディアンフィルタ適応後の振動エネルギー分布 (カラースケール統一後)  
(a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

図 3.5.2.7 より、埋設深さ 50 mm が 20 mm より振動エネルギーが大きくなっているが、これはメディアンフィルタにより埋設深さ 20 mm の最も振動エネルギーが大きかった測定点が中央値に変換された事が要因である。図 3.5.2.7 の各埋設部上と思われる測定点中で最大値を示している箇所を比較すると約 8.5 倍の振動エネルギー差がある。このように埋設物が関係する振動エネルギーが高い値を示す測定点が隣接・密集していない場合はメディアンフィルタの使用には注意が必要である。

#### (まとめ)

実験結果から、直径 180 mm の場合は、深さ 100 mm ぐらいまでは検出可能であることが確認できた。同様に直径 100 mm の場合は、深さ 50 mm ぐらいまでは検出可能であることが確認できた。また、音波照射加振の場合、地表面にある小石等がノイズ源となる場合があるが、メディアンフィルタを適用することにより改善できる場合があることが明らかになった。

### 3.5.3 UAV 改良による効果

2021/02/24~26 に佐藤工業の埋設物試験場に埋設した 300 mm ポールベース (深さ 50 mm) を非接触で測定を行った。この実験では以下の条件で測定を行った(図 3.5.3.1 参照)。

- ・音源台に平面音源を固定して使用する。
- ・UAV に搭載している平面音源(音源振動対策有:フリーマウント)を使用する。
- ・UAV に搭載している平面音源(音源振動対策無:リジッドマウント)を使用する。

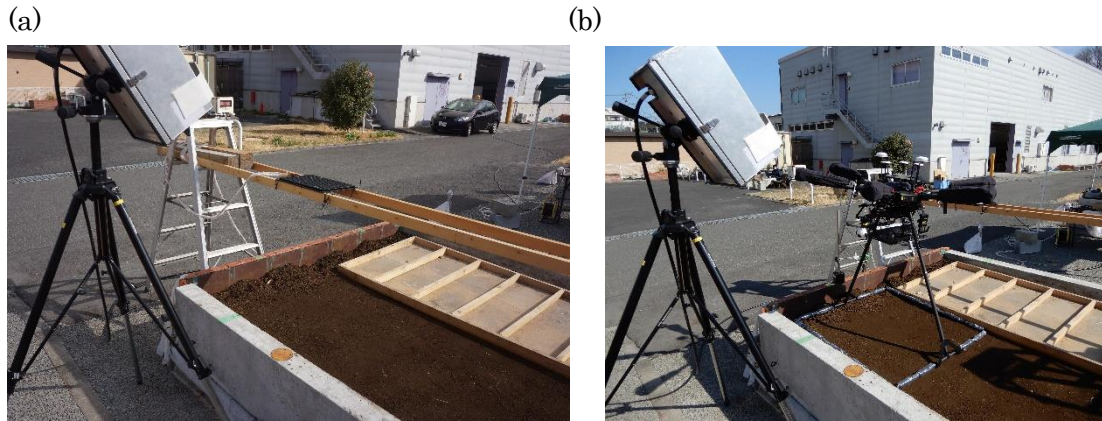


図 3.5.3.1 実験風景

(a)音源台を使用時、(b)UAV 搭載音源を使用時

#### (実験セットアップ)

この実験に使用した埋設物は直径 300 mm のポールベースである。実験セットアップを図 3.5.3.2 に示す。測定エリア中央から約 1.4 m の位置にレーザドップラ振動計を設置し、音源は測定エリアの直上約 0.7 m にあるものとする。測定方法は音源から音波を土壤に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面音源(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500 Xtra を使用した。

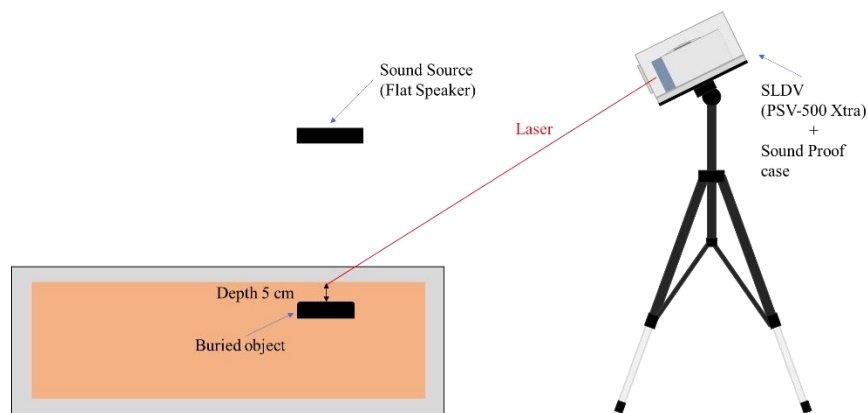


図 3.5.3.2 実験セットアップ図

**(測定結果 1：音源台使用時)**

図 3.5.3.3 に測定エリアを示す。測定点数は 99 点(縦 9×横 11 points)とし、測定点間隔は縦 4.87 cm、横 6.37 cm である。測定エリア中央に直径 30 cm の紙を置き、測定点密度の調整を行った。また、音源の設置条件にかかわらず測定エリアは全て同じ設定で行った。なお、送信波形は 50-152Hz のシングルトーンバースト波を用いた。

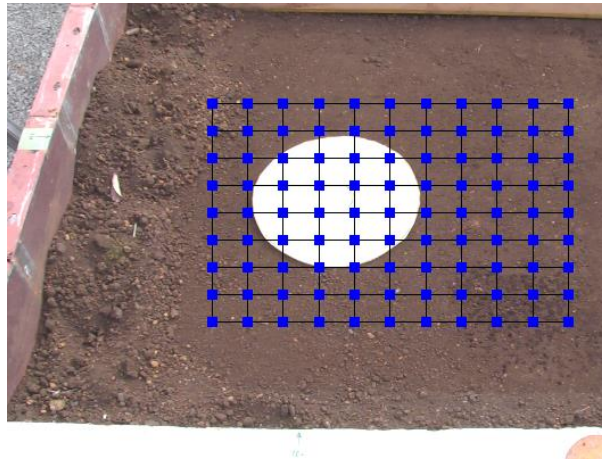
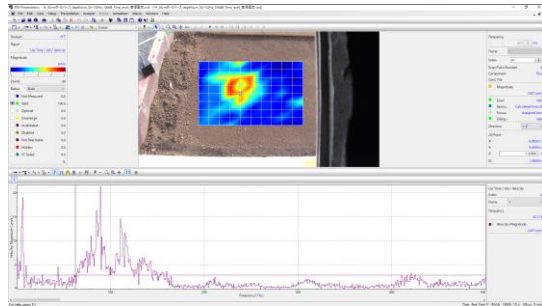


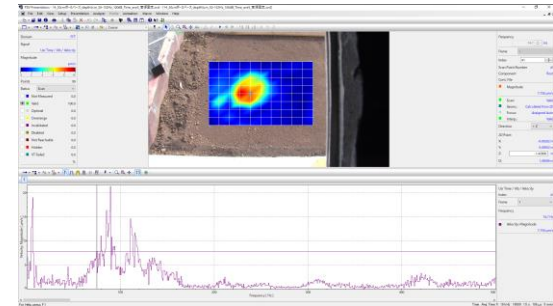
図 3.5.3.3 測定エリア

次に、図 3.5.3.4 に音源台使用時の振動速度スペクトルと振動速度分布を示す。

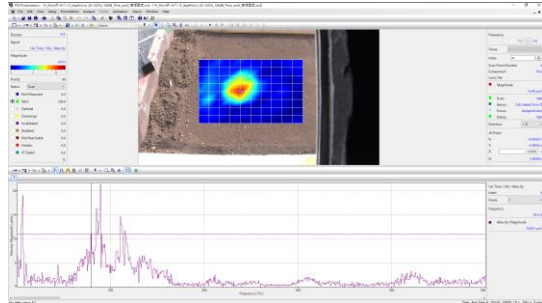
(a)62.7 Hz



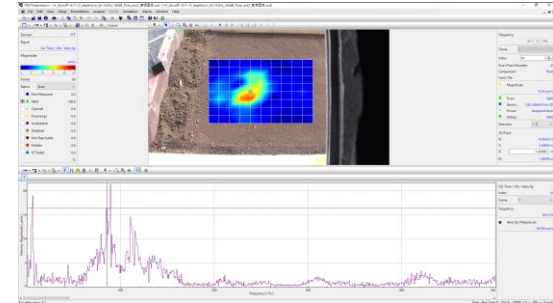
(b)74.7 Hz



(c)79.3 Hz



(d)85.3 Hz



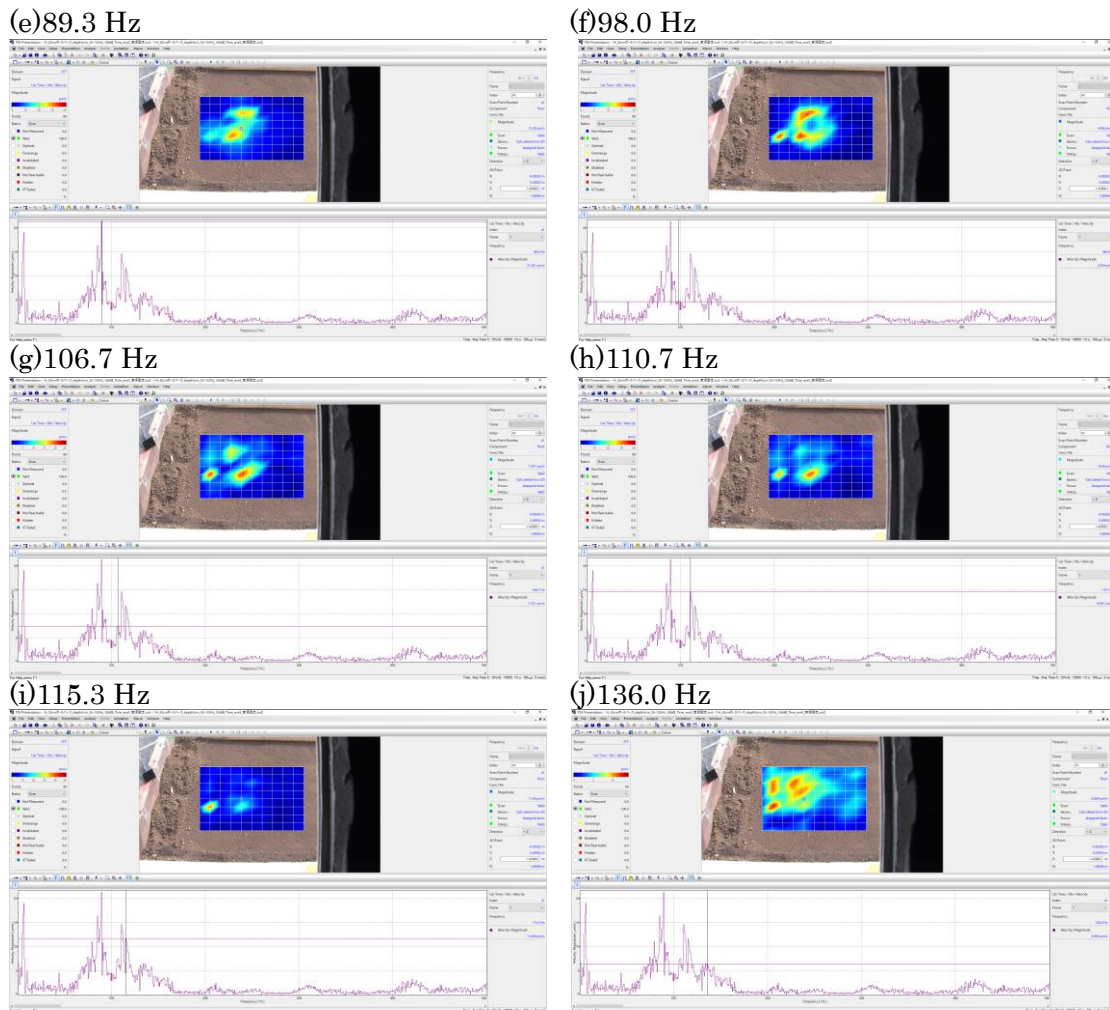


図 3.5.3.4 振動速度分布と振動速度スペクトル (Index 41)  
 (a)62.7 Hz、(b)74.7 Hz、(c)79.3 Hz、(d)85.3 Hz、(e)89.3 Hz、  
 (f)98.0 Hz、(g)106.7 Hz、(h)110.7 Hz、(i)115.3 Hz、(j)136.0 Hz

図 3.5.3.4 より、62.7 Hz~136.0 Hz まで埋設物の形状に似た分布が確認できる。次に振動エネルギー分布を図 3.5.3.5 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域と同じである。

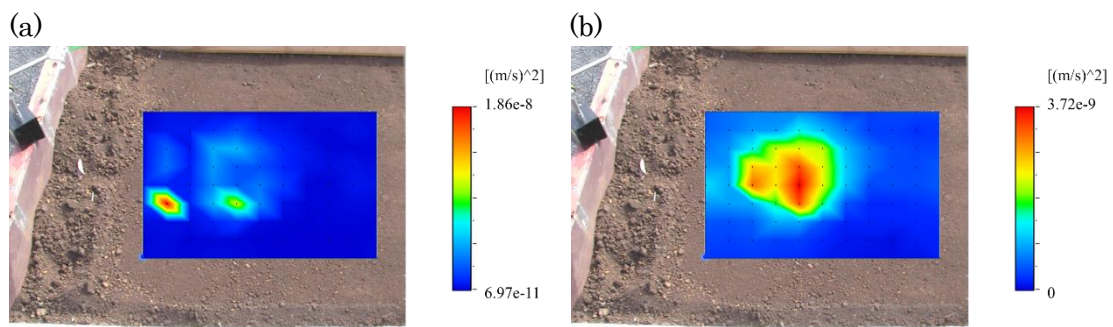


図 3.5.3.5 振動エネルギー分布  
 (a)音源台使用、(b)メディアンフィルタ適応後

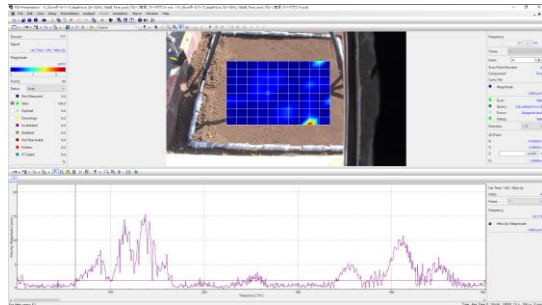


図 3.5.3.5(a)より振動エネルギーが高い場所が数点点在し、測定エリア中央付近に振動エネルギーがやや高く密集している分布が確認出来る。そのため、メディアンフィルタを適応したところ図 3.5.3.5(b)のように埋設物と似た形状で振動エネルギーの高い測定データが密集している分布が確認された。

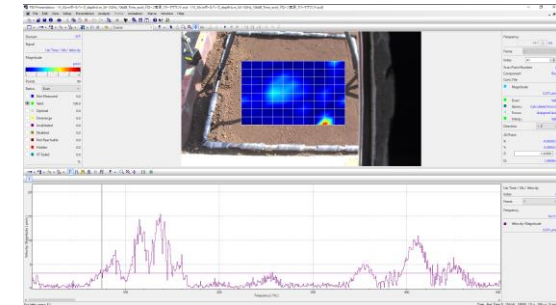
**(測定結果 2 : UAV 搭載音源を使用時)**

測定エリアは前節と同じである。図 3.5.3.6 に UAV 搭載音源使用時(音源振動対策有：フリーマウント)の振動速度スペクトルと振動速度分布を示す。

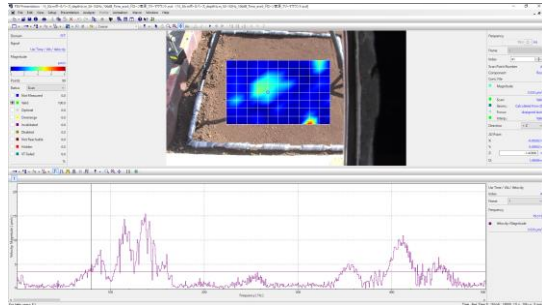
(a)62.7 Hz



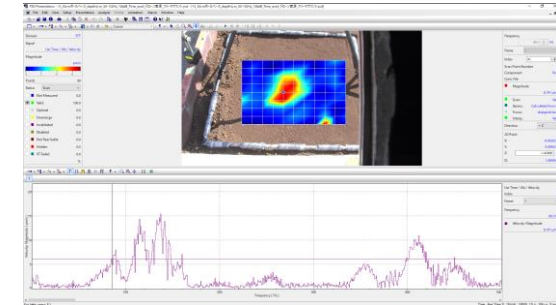
(b)74.7 Hz



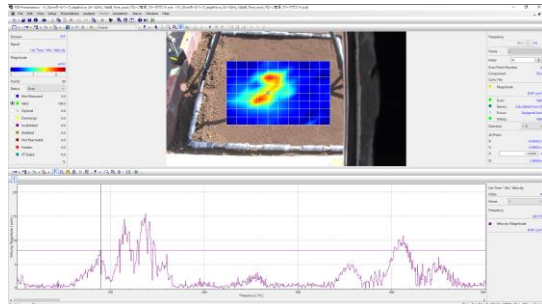
(c)79.3 Hz



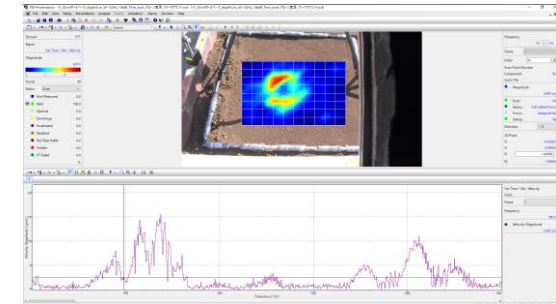
(d)85.3 Hz



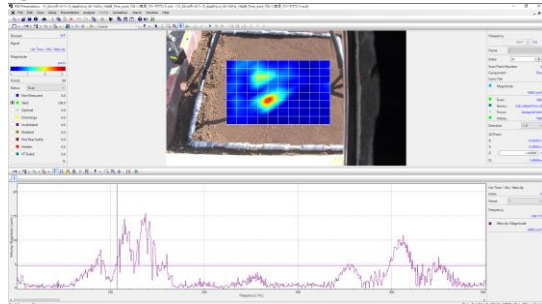
(e)89.3 Hz



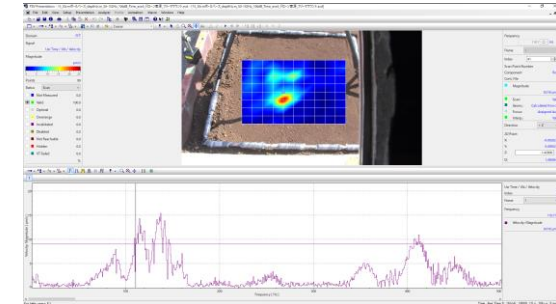
(f)98.0 Hz



(g)106.7 Hz



(h)110.7 Hz



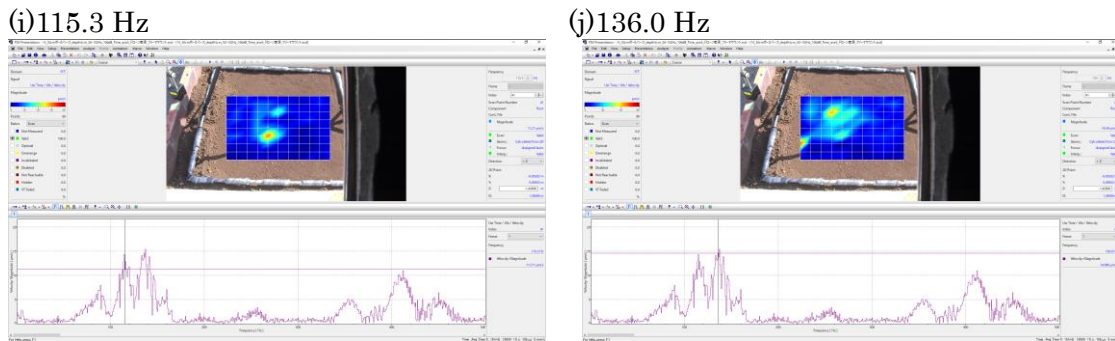


図 3.5.3.6 振動速度分布と振動速度スペクトル (Index 41)  
 (a)62.7 Hz、(b)74.7 Hz、(c)79.3 Hz、(d)85.3 Hz、(e)89.3 Hz、  
 (f)98.0 Hz、(g)106.7 Hz、(h)110.7 Hz、(i)115.3 Hz、(j)136.0 Hz

図 3.5.3.6 より、62.7 Hz~136.0 Hz まで埋設物の形状に似た分布が確認できる。次に振動エネルギー分布を図 3.5.3.7 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域(50 Hz~152 Hz)と同じとした。

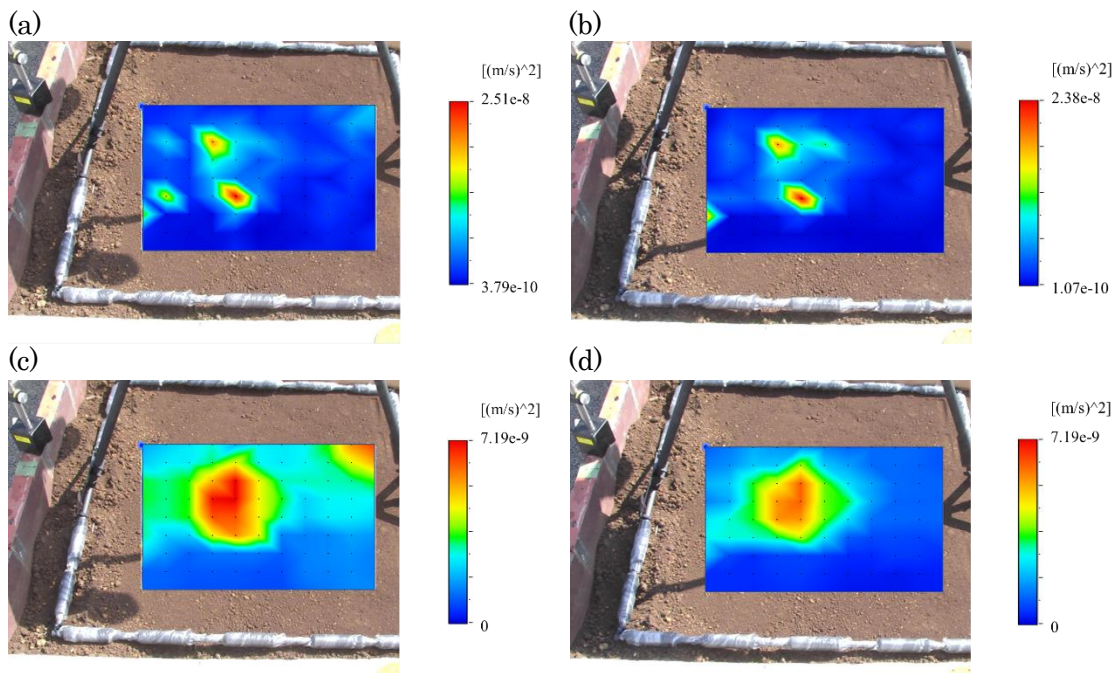


図 3.5.3.7 振動エネルギー分布

- (a)音源振動対策無 (リジッドマウント)、(b) 音源振動対策有 (フリーマウント)、  
 (c)音源振動対策無 (リジッドマウント) +メディアンフィルタ適応、  
 (d) 音源振動対策有 (フリーマウント) +メディアンフィルタ適応

図 3.5.3.7(a)(b)より振動エネルギーが高い場所が数点点在し、測定エリア中央付近に振動エ

エネルギーの値がやや高く密集している分布が確認出来る。そのため、メディアンフィルタを適応したところ図 3.5.3.7(c)(d)のように埋設物と似た形状で振動エネルギーの高い測定データが密集している分布が確認された。また、振動対策無しのデータは測定エリア右上付近において振動エネルギーの値が高いが、振動対策有りのデータでは周囲と変わらない値となっている。図 3.5.3.8 に測定エリア右上(Index 91)の振動速度スペクトルを示す。

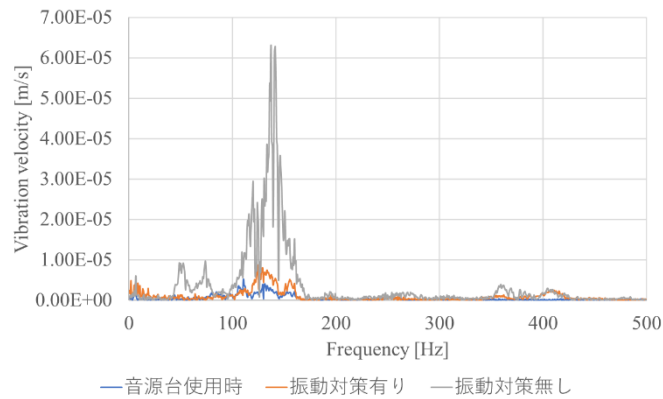


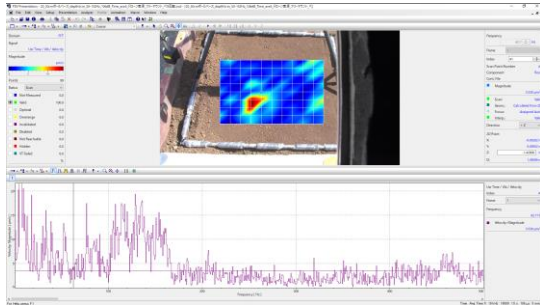
図 3.5.3.8 音源振動対策の有無における振動速度スペクトル

図 3.5.3.8 より音源から UAV 本体に伝わる振動の対策をする事によって、地表面に伝わる振動を抑制出来ている事がわかる。

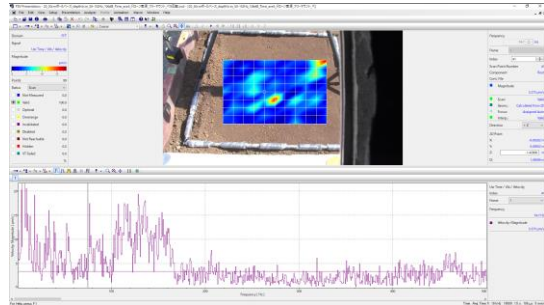
### (測定結果 3 : UAV 搭載音源を使用時、プロペラ回転時)

測定エリアの説明は上記と同じ場所を測定したので割愛する。図 3.5.3.9 にプロペラを回転させた状態でド UAV 搭載音源を使用時(音源振動対策有り)の振動速度スペクトルと振動速度分布を示す。

(a)62.7 Hz



(b)74.7 Hz



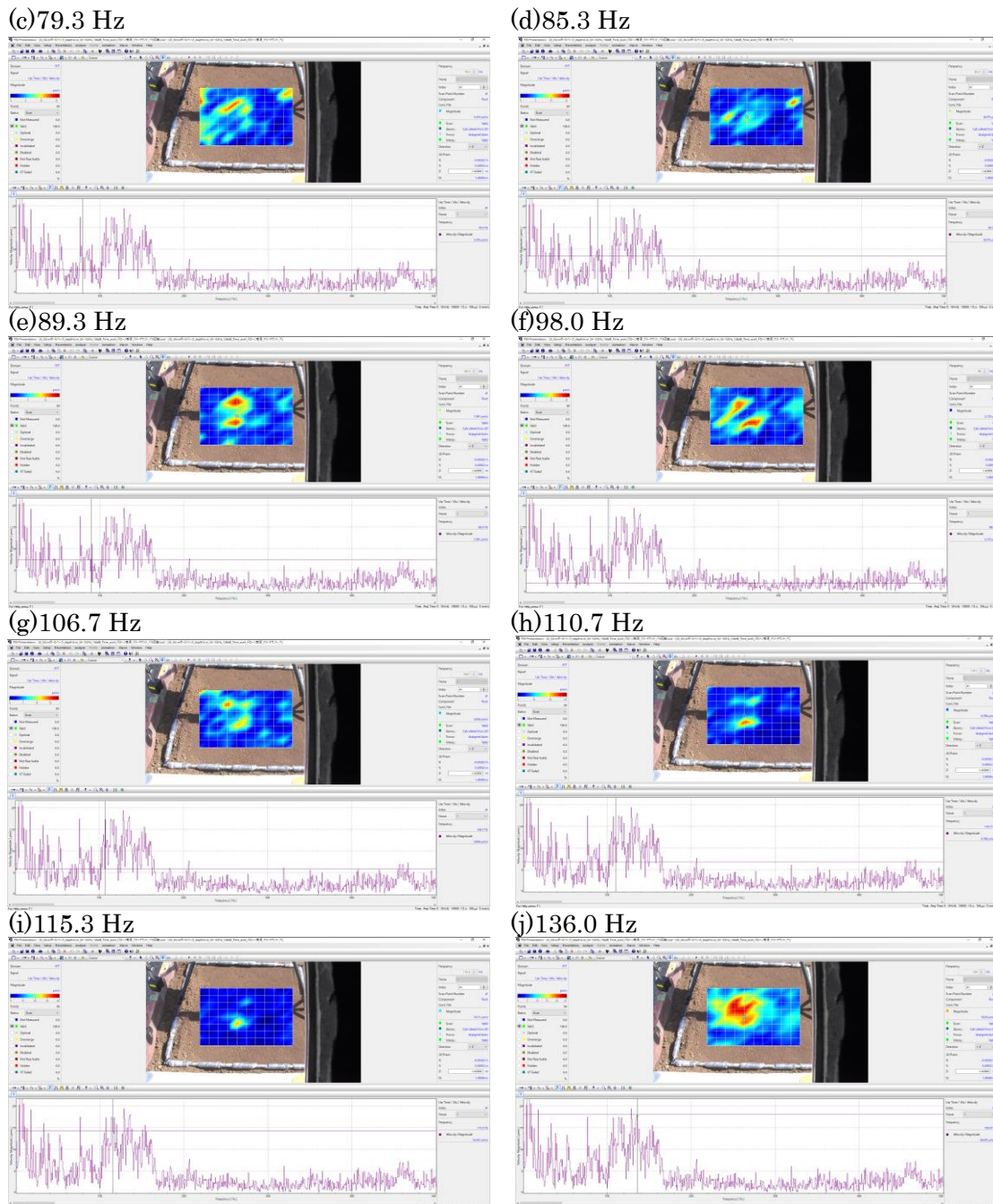


図 3.5.3.9 振動速度分布と振動速度スペクトル (Index 41)  
 (a)62.7 Hz、(b)74.7 Hz、(c)79.3 Hz、(d)85.3 Hz、(e)89.3 Hz、  
 (f)98.0 Hz、(g)106.7 Hz、(h)110.7 Hz、(i)115.3 Hz、(j)136.0 Hz

図 3.5.3.9 より、136.0 Hz において埋設物に似た形状の振動速度分布が確認出来る。ただし、それ以外の周波数では不明瞭な印象を受ける。次に振動エネルギー分布を図 3.5.3.10 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域(50 Hz～152 Hz)と同じとした。

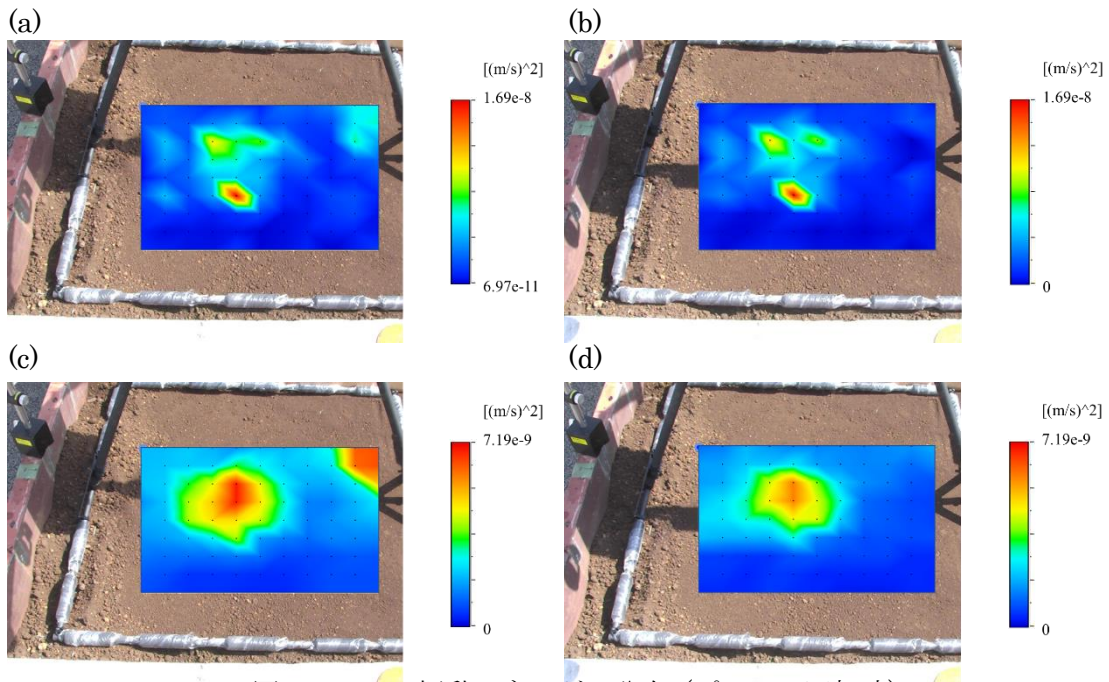


図 3.5.3.10 振動エネルギー分布 (プロペラ回転時)

- (a)音源振動対策無し、(b) 音源振動対策有り、  
(c)音源振動対策無し+メディアンフィルタ適応、  
(d) 音源振動対策有り+メディアンフィルタ適応

図 3.5.3.10 よりメディアンフィルタを適応する事で、埋設物と似た形状で振動エネルギーの高い測定データが密集している分布が確認された。プロペラを回転させていないデータ(図 3.5.3.7)と比較すると微妙に分布に差異があるが、埋設物の大まかな位置の推定には影響しないようである。測定終了後、埋設物の位置と測定結果を比較するため、表層の土を掘り返した。掘り返す前に測定点の4隅に竹串を刺し、直上から撮影を行った。

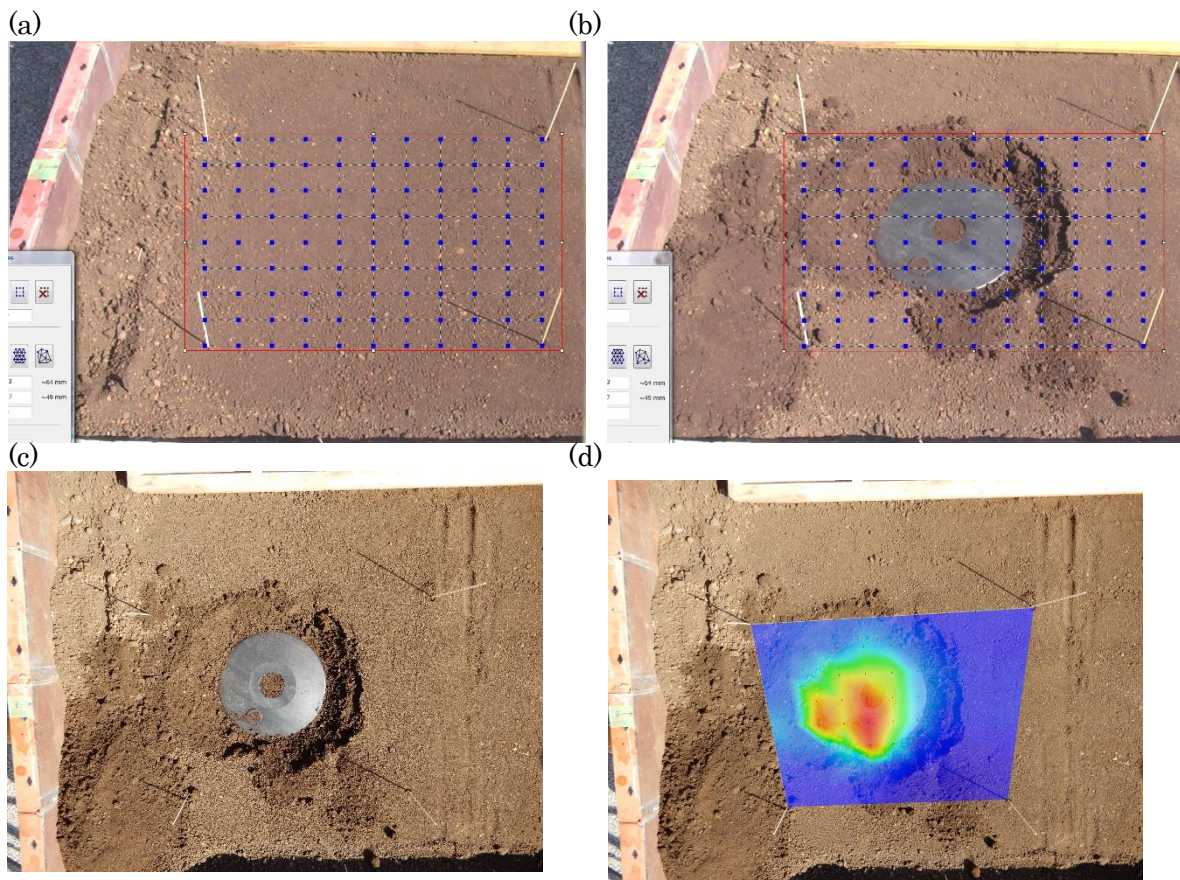


図 3.5.3.11 埋設物位置

(a)竹串の挿入位置、(b)表層土を掘り返した写真、(c)埋設物直上からの写真、  
(d)音源台を使用したデータの振動エネルギー分布

図 3.5.3.11 より埋設物と振動エネルギーが高い値を示す場所はほぼ一致している事がわかる。

#### (まとめ)

2021/02/24~26 に佐藤工業の埋設物試験場に埋設した 300 mm ポールベース（深さ 50 mm）を非接触で測定を行い解析した。振動エネルギー分布から UAV に搭載されている音源の振動対策の有無の差が確認された。また、地面に UAV が接地している時にプロペラ（ロータ）がアイドリング程度の回転であれば、探査結果にあまり影響しない事も確認された。

### 3.5.3 まとめ

飛行中の UAV からの音波照射加振を試みた結果、低空のホバリング状態では、ロータからの風の影響により、浅層埋設物の反応が明瞭に得られない場合があることが判明した。そこで、UAV 着陸状態での計測を行ったところ、今度は音源の振動が着陸脚部を通じて地

面に伝搬して、計測結果に影響することが明らかになった。そこで、音源マウント方法や着陸脚の改良を施すことにより、音源を空中に配置した場合と同等の結果が得られることが確認された。また、アイドリング程度のロータ回転であれば、探査結果にはあまり影響しないことも明らかになった。なお、着陸状態による計測であったとしても、音源位置を自由に変更できるという本手法の持つ本質的な利点は失われておらず、むしろ、音源位置の変動が無くなるために計測結果が安定するほか、バッテリーの消耗も少なくなるために、広範囲の探査には適していると思われる。



(実験時参考写真 C：厚木の埋設物試験場における UAV 着陸時計測 2021 年 2 月 25 日)

## 4. 委託業務全体の成果

### 4.1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

計画時には UAV からの音波照射加振は、飛行中は位置精度の問題で難しくとも計測領域の上に着陸してしまえば、問題なく実施できるはずであると想定していた。しかしながら、実験結果から、着陸脚からの振動が結果に悪影響を及ぼすことが明らかになった。この振動は音源自体から発生しており、UAV 本体に音源を直接取り付けていたのが原因であった。そこで、音源はバネを介したフリーマウントとし、着陸脚もカーボン製の大型のものへと改良した。その結果、UAV 着陸時でも問題なく探査が行えるようになることを確認した。また、着陸時には UAV のプロペラはアイドリング状態となるため、ほとんどバッテリーを消費しないという副次的効果も生まれた。このことは計測可能時間が長くとれることを意味している。

また、実は今回の報告書本文では触れていないが、LDV 側にも大きな進歩があった。それは Polytec 社の Qtac と呼ばれる技術であり、複数の検出器を搭載することで、従来問題となっていたノイズを低減させて S/N 比を向上させるという技術である。将来的には、この技術が搭載された SLDV が登場することが予測されるため、現在よりも高い S/N 比が実現

できるようになることが期待される（すなわち、感度が向上するため、より厳しい条件下でも探査可能になることを意味している）。

#### 4.2 研究課題の発展性（間接効果を含む）

今回の研究では、あくまでも基礎研究であるということから国内で簡単に手に入る埋設物として、近隣のホームセンターで手に入る中空円形容器を用いた。しかしながら、中空容器と内容物が入った容器では結果が異なる可能性がある。実際に探知したい埋設物に対する検討も将来的には必要であると考ええる。

#### 4.3 研究成果の発表・発信に関する活動

本研究は平成 30（2018）年 12 月に開始されたが、音源搭載型 UAV の導入は令和元(2019)年 9 月であったため、令和元(2019)年度は主として実験および計測データの検討のみを実施した。令和 2（2020）年度より、国内国際学会における発表活動を実施したが、新型コロナウイルスの影響により、すべてオンライン開催となっている。しかしながら、オンライン開催による利点もあり、ほぼ同じ期間に開催された複数の学会において参加発表を行うことができた。

## 5 プロジェクトの総合的推進

### 5.1 研究実施体制とマネジメント

令和 2 年度は新型コロナによる影響により、学外における探査実験が 8 月まで実施できなかった他、参加を予定していた学会も中止もしくはオンライン発表となる状況であった。特に緊急事態宣言が出されていた 4 月は、研究スタッフの集まりも十分ではなかったこともあり、令和元年度の研究報告書の提出締め切り自体も 1 か月ほど延長して頂いて対応した。しかしながら、5 月以降は、研究スタッフに在宅ワークでのデータ処理を認めると共に研究 Meeting も Meet を用いたオンライン会議を利用することにしたことから、徐々に研究活動のペースを復活させることができた。

### 5.2 経費の効率的執行

前述のようにコロナ禍の影響で、参加を予定した学会の多くはオンライン発表となってしまったため、予定していた旅費の多くが使い切れない状況となった。しかしながら、2020 年 8 月および 10 月に実施した探査実験結果より、試作した音源搭載型 UAV の問題点（音源マウントおよび着陸脚）が明らかになったため、音源マウントおよび着陸脚の改良費として経費を効率的に使用した。



## 6 まとめ、今後の予定

### 6.1 本研究により得られた成果

本研究では、中空円形容器を埋設物として様々な種類の土壌（珪砂、関東ローム土、シルト土、赤土）において、UAV に搭載可能な平面音源からの音波照射加振を用いた浅層地中探査実験を行った。本研究により得られた成果を以下に列挙する。

・最初に珪砂の実験結果から、埋設物を検出する周波数は、埋設物の大きさには反比例するものの、深さを変化させても、あまり変わらないことが明らかになった。そのため、埋設物の深さを細かく変化させて検出周波数がどのように推移するのか実験してみたところ、地表面に近い場所ではたわみ共振に近い周波数で振動するものの、深くなるにつれて減少し、およそ深さ 20 mm 以降はほぼ一定となることが確認された。これは埋設状態における埋設物自体の振動が地表面で観測されていることを意味していると思われる。

・埋設物試験場において、様々な種類の土壌（関東ローム土、シルト土（つくばの表層土）、赤土（グラウンド土））を用いた実験結果から、埋設物の深さと大きさ（直径）毎の探査結果を表 6.1 に示す。図より、土壌の種類や状態（含水率や締固度）および音圧にも依存すると思われるが、検出可能な埋設物（中空容器の場合）の最大深さは、直径 300 mm のプラスチックベースで約 100~150 mm、直径 180 mm のホーロー容器で約 100 mm および直径 100 mm のホーロー容器で約 50 mm 程度であることが明らかになった。これは、探査可能な深度は、埋設物の直径のおよそ半分程度であることを意味している。

表 6.1 探査可能な深さと埋設物の大きさ（直径）

		直径 [mm]		
		100	180	300
深さ [mm]	150	○	×××	○△×
	100	○×	○○×	○○
	50	○△○	○	○
	20	○		

○珪砂      ○シルト      ○赤土      ○関東ローム

・関東ローム土を用いた実験では、遠距離からの計測を試み、LDV から埋設物までの距離が約 20 m であっても検出可能であることが明らかになった。ただし、この結果はレーザーヘッドの高さは約 2 m 時の結果であり、使用した LDV（赤外線レーザー 1550 nm, 10 mW）の性能を考えると、仮にレーザーヘッドの高さを約 10 m に設定できれば、土表面へのレーザーの入射角度は 20 m 時と変わらないため、100 m の離隔であっても、20m 離隔時と同様に検出可能であると思われる。この理由は、距離が増えて、レーザー光の照射面積が増えても、

その照射範囲内で最も強い反射光を放つ部分の信号が有効となるため、地表面への入射角が同じであれば、ドップラ効果により計測される振動速度自体には影響がないためである。

・地中探査用の音波照射加振波形については、コンクリート構造物の欠陥探査用のトーンバースト波を基本にして、計測速度を優先したインターバル時間を省略したマルチトーンバースト波、加振力を重視してパルス持続時間が長くしたシングルトーンバースト波が考案された。それぞれの特徴としては、前者は遠距離から高速にスキャンを行いたい場合に適しており、後者は比較的大きめの埋設物（直径 180~300 mm）を明確に検出したい場合に適しているといえる。

・浅層地中探査用に音源搭載型 UAV を試作した。音源としては主として積載重量の関係から平面音源(2.2 kg)を採用した。機体全体の重さは約 10 kg で、飛行可能時間は約 20 分程度である。飛行中の音源搭載型 UAV からの音波照射加振を試みた結果、低空のホバリング状態では、ロータからの風の影響により、浅層埋設物の反応が明瞭に得られない場合があることが判明した。そこで、UAV 着陸状態での計測を行ったところ、今度は音源の振動が着陸脚部を通じて地面に伝搬して、計測結果に影響することが明らかになった。そこで、音源マウント方法や着陸脚の改良を施すことにより、音源を空中に配置した場合と同等の探査結果が得られることが確認された。また、アイドリング程度のロータ回転であれば、探査結果にはあまり影響しないことも明らかになった。なお、着陸状態による計測であったとしても、音源位置を自由に変更できるという本手法の持つ本質的な利点は失われておらず、むしろ、音源位置の変動が無くなるために計測結果が安定するほか、バッテリーの消耗も少なくなるために、広範囲の探査には適していると思われる。

## 6.2 今後の予定

今回の研究結果により、埋設物として中空円形容器を用いた場合の音波照射加振による浅層地中探査に関する基礎特性が明らかになった。しかしながら、埋設物として、容器内に内容物がある場合には、重量も増加するために得られる反応が異なる場合が考えられる。そのため、研究予算次第であるが、容器内に内容物を入れた場合の検討も実施する必要があると考えている。

## 7. 研究発表、知的財産等の状況

### 7.1 研究発表等の状況

研究開始から終了までの全期間における研究発表等の状況を下表に示す。

種別	件数
学術論文	3件
学会発表	10件
展示・講演	1件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

### 7.2 知的財産等の状況

該当なし

### 7.3 その他特記事項

該当なし

## 謝辞

本報告書の作成にあたって、赤外線レーザを搭載した SLDV 機材の貸し出しをしていたポリテックジャパン(株)の水谷哲哉氏に感謝いたします。



(実験時参考写真 D : 厚木の埋設物試験場における UAV 着陸時計測 2021 年 2 月 25 日)

## 参考文献

- 1) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : Study on Non contact acoustic imaging method for concrete structures - Improvement of signal-to-noise ratio by using tone burst wave method, Proc. IEEE Int. Ultrasonic Symp. 2013, pp.1303-1306, (2013).
- 2) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto and N.Utagawa,” Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, (2014.6).
- 3) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda and K.Katakura,” Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, (2015.7).
- 4) 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 歌川紀之 : マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.2103-2108, (2016).
- 5) T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 07JC10, (2017).
- 6) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 川上明彦: インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法,-マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証-, 平成 29 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.149-154, (2017).
- 7) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳, 金子岳夫, 森岡宏之, 志岐仁成, 中川貴之 : 地下大空洞内の吹付けコンクリートに対する非接触音響探査法の適用性検討, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-8, pp.1-6, (2017).
- 8) 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 森岡宏之 : 非接触音響探査法による吹付けコンクリートにおける欠陥検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1707- 1712, (2018).
- 9) 杉本恒美, 杉本和子, 上地樹, 歌川紀之, “外壁検査のための音源搭載型 UAV を用いた高速非接触音響探査法”, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1901-1906, (2019).
- 10) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda,” Detection of resonance frequency of both the internal defects of concrete and the laser head of a laser Doppler vibrometer by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.58, SGGB15, (2019).

# 付録

## A 陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性について

陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性図を下図に示す。この特性表を参考にして、2019年8月時の実験では含水率を約40%程度に調整した実験を行っている。

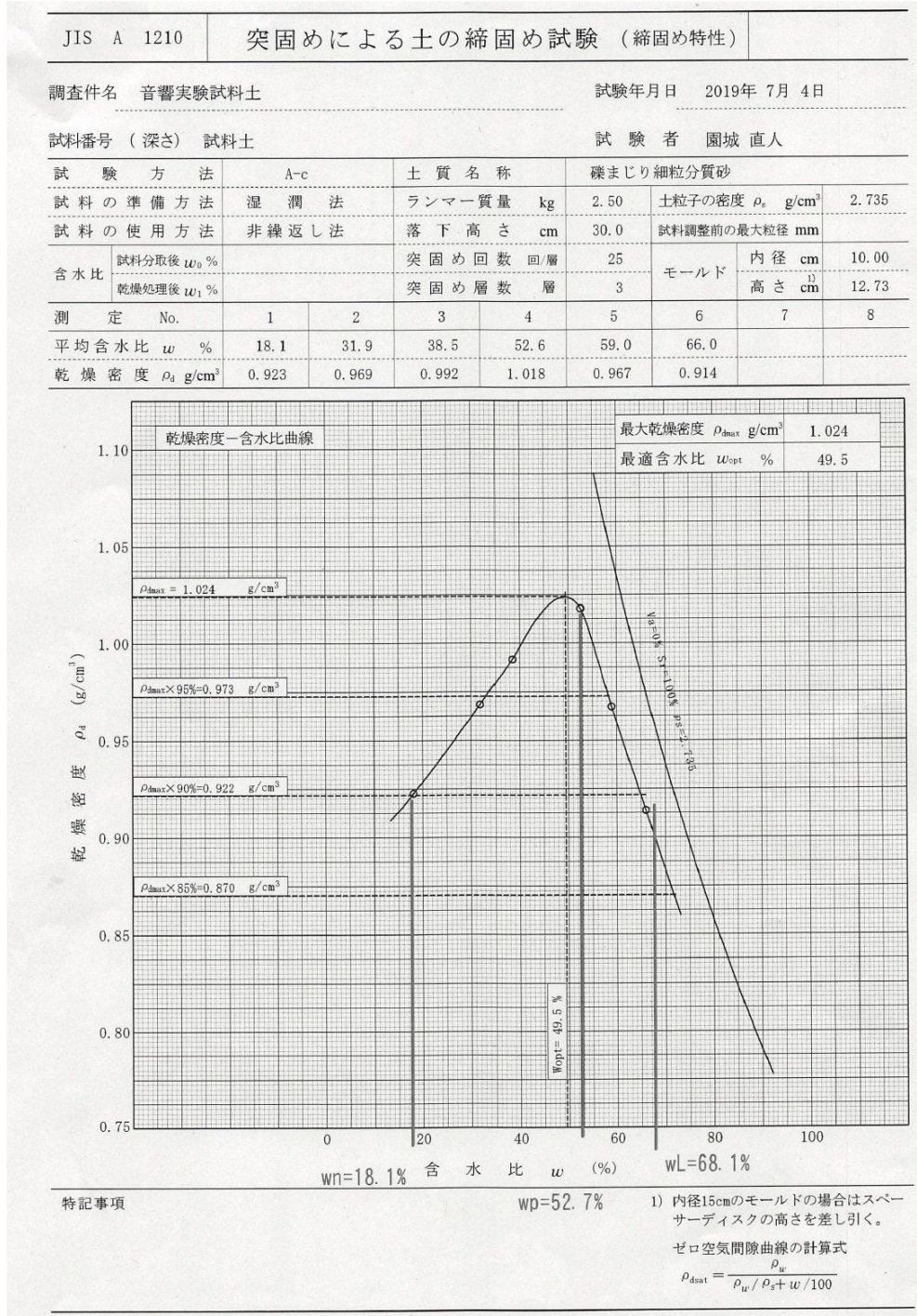


図 A 陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性図

B 陸装研・管理土槽室にて 2019 年 8 月に実施した実験内容表

30 cm ポールペーン		18 cm ホーロー容器		10 cm ホーロー容器										
欠陥深度	計測距離	加水	実施	欠陥深度	計測距離	加水	実施	欠陥深度	計測距離	加水	実施			
5 cm	1 m	有り	○	5 cm	1 m	有り	○	5 cm	1 m	有り	○			
		無し	○			無し	○			無し	○			
		有り				有り				有り				
	3 m	有り	○		3 m	有り	○		有り		3 m	有り		○
		無し	○			無し	○			無し				
		有り				有り				有り				
	10 m	有り	○		10 m	有り	○		有り		10 m	有り		○
		無し	○			無し	○			無し				
		有り				有り				有り				
	20 m	有り	○		20 m	有り	○		有り		20 m	有り		○
		無し	○			無し	○			無し				
		有り				有り				有り				
30 m	有り	○	30 m	有り	○	有り		30 m	有り		○			
	無し	○		無し	○		無し							
	有り			有り			有り							
10 cm	1 m	有り	○	10 cm	1 m	有り	○	10 cm	1 m	有り	○			
		無し				無し				無し				
		有り				有り				有り				
	3 m	有り			3 m	有り			有り		3 m	有り		
		無し				無し				無し				
		有り				有り				有り				
	10 m	有り			10 m	有り			有り		10 m	有り		
		無し				無し				無し				
		有り				有り				有り				
	20 m	有り			20 m	有り			有り		20 m	有り		
		無し				無し				無し				
		有り				有り				有り				
30 m	有り		30 m	有り		有り		30 m	有り					
	無し			無し			無し							
	有り			有り			有り							

### C 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーについて

本研究では非接触音響探査法による計測評価に振動エネルギー比(VER:Vibration Energy Ratio)とスペクトルエントロピー(Spectral entropy)という 2 つの音響特徴量の分布を用いている。実際のコンクリート内部欠陥は複雑な形状をしていることから、欠陥規模を明らかにするために特定の周波数範囲内の振動速度スペクトル値の二乗値(パワースペクトル値)の積分値を振動エネルギー、(C-1)式のような振動速度スペクトルの積分値を振動エネルギー比と定義して用いて。ここでは、 $PSD_{defect}$ 、 $PSD_{health}$ はそれぞれ欠陥部、健全部のパワースペクトル密度(PSD: Power Spectral Density)、 $f_1$ および $f_2$ は積分時の下限および上限周波数である。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \right) \quad (C-1)$$

健全部の評価では、健全部の振動エネルギーの最小値を基準として、健全部の振動エネルギーの分布を計算することになる。また、スペクトルエントロピーとは、信号の白色性を表す音響学的特徴量であり、信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算したもので、(C-2)式で定義される。ここで、 $S_f$ は測定点での振動速度のパワースペクトルである。

$$H_{SE} = - \sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \quad (C-2)$$

$H_{SE}$ はスペクトルが均一な白色信号では高い値となる。例えば、受光漏れによる計測不良点では白色ノイズに近いいため、また健全部でも振動速度振幅は低い特徴的なピークを持たないため、どちらも白色性が高くなり  $H_{SE}$ も高い値を示して区別できない。しかしながら、この SE と VER という 2 つの音響特徴量を組み合わせ、閾値を適切に選択できれば、欠陥部、健全部および計測不良点の識別が可能となる(表 C 参照)。

表 C 健全部・欠陥部・計測不良点の識別

	健全部	欠陥部	計測不良点
振動エネルギー比(VER)	低い	高い	高い
スペクトルエントロピー(SE)	高い	低い	高い

## D UAV を着陸させた状態の計測について

図 D-1 に UAV 着陸状態での計測セットアップ例を示す。



図 D-1 UAV 着陸状態での計測セットアップ例

この UAV の着陸脚は T 字型をしているため、UAV の向きを調整することにより、UAV の真下領域に LDV の計測領域を設定すること自体は可能であることが分かる。



図 D-2 UAV の着陸脚と音源の位置関係

図 D-2 に UAV の着陸脚と音源の位置関係を示す。着陸脚間の長さは約 500 mm で、音源はそれから約 300 mm 程度上方に取り付けられている。



また、着陸時の音源高さを変更できるように図 D-3 に示すような着脱式高脚脚も製作した。

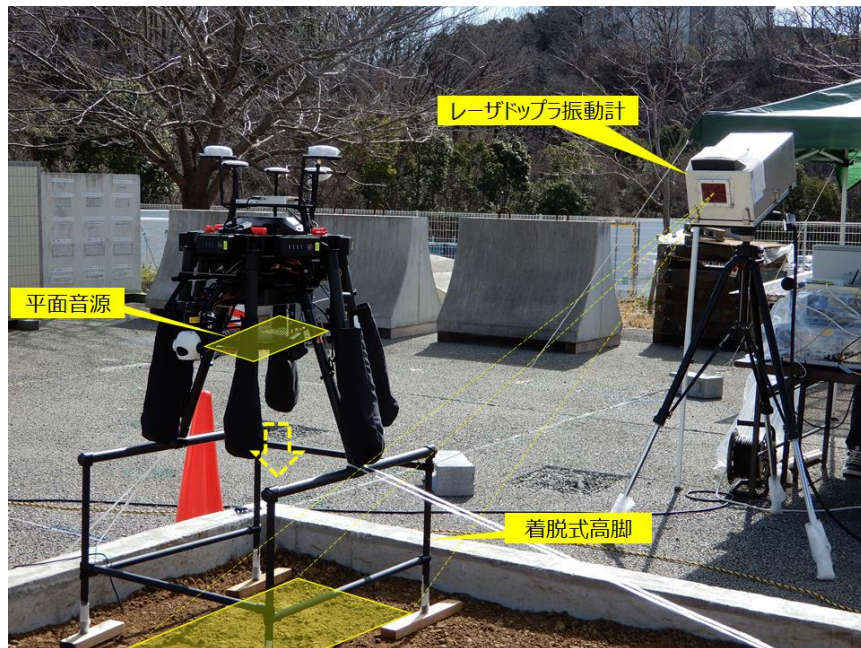


図 D-3 着脱式高脚脚が付いた状態の UAV (ロータは格納状態)

この図は、UAV の可動式脚に、着脱式高脚を取り付けた状態のものであり、この状態でも UAV は飛行可能である。着脱式高脚の高さは約 400 mm であるため、着陸時には、地面から音源までの高さは約 700 mm となる。UAV 着陸状態での計測のメリットは、音源が地面に対して固定されているために、各種信号処理が適用しやすくなること、および UAV のロータ回転数を落とすことにより、ロータ風による雑音が低下し S/N 比の向上が期待できることなどが挙げられる。

## E メディアンフィルターについて

土の振動を測定する際に、埋設物上ではない場所が振動しやすい時がある。要因として小石や雑草等が音波または風により振動している事が挙げられる。そのような測定点がある場合の対処としてメディアンフィルタを検討した。メディアンフィルタは画像のノイズを除去する手法として用いられている。例として図 E-1 に示すような正方形の領域の中心の値を、中心の値を含む周りの値の中心値に変換する手法である。

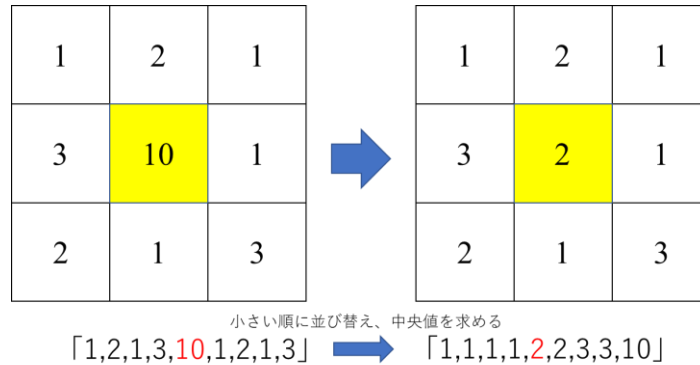


図 E-1 メディアンフィルタの概要

メディアンフィルタ使用時に埋設物に対して十分な測定点が確保されている場合、図 E-1 のように値の高い測定点が隣接し、埋設物と似た形状になる測定結果が得られる。このようなデータに対してメディアンフィルタを適応するとノイズの除去は正常に行われる。しかし、埋設物に対して測定点密度が十分でない場合、突出して高い値を示す埋設物上の測定点は中央値に変換され検出が難しくなる。振動エネルギー分布への適応例を図 33 に示す。

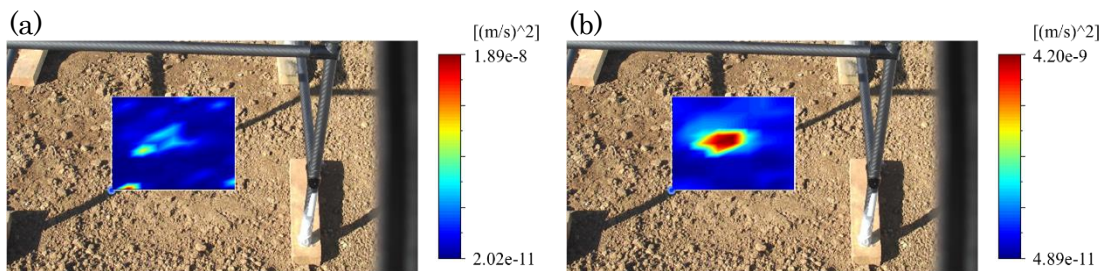


図 E-2 振動エネルギー分布へのメディアンフィルタの適応例

(a)元データ、(b)メディアンフィルタ適応後

\* 2020/2/18 の佐藤工業(厚木)における 50 mm ホーロー容器の測定

図 E-2(a)は左下に高い値を示す測定点があり、中央付近にあると想定される埋設物の色味が薄く表現されている。そこで、メディアンフィルタを適応すると左下の値が高かった測定点は中央値に変換されて、埋設物と思われる反応が明瞭になった。この結果から処理用オプションとしてメディアンフィルタを用いる事は有効であることが分かる。

## F 埋設物があることによる共振周波数の変化について（実際の地雷との比較） （背景と目的）

地中探査実験のデータを空間フィルタで前処理（ローパス）し、広帯域（ $\Delta f=20\text{Hz}$ ）分析した結果、埋設深さが深くなっても埋設物の共振周波数帯域自体はあまり変化しないものの、最大振動速度を示す共振周波数は上がる傾向があることが判明した(後述)。ところが、米国における同様な実験[参考文献 F1]では、全く逆の傾向を示しており、得られた結果が相容れないことが判明した。そのため、この違いの原因について、詳細な比較検討を行った。

### （データ取得条件）

日時；2020.08.17

測定場所；佐藤工業（厚木）

SLDV；PSV-500Xtra

測定ポイント：縦 11x 横 13

送信波形；50-200Hz\_wd1.4s\_chF25Hz\_pd20ms\_intT200ms（シングル）

音源；平面音源（音源固定）

測定対象；180 mm ホーロー 深さ 50 mm (45 mm) 95.2dB (実験 No.2)

180 mm ホーロー 深さ 100 mm(92mm) 95.4dB (実験 No.3)

180 mm ホーロー 深さ 150 mm 95.2dB (実験 No.6)

埋設物なし 95.2dB (実験 No.7)

### （実験結果例）

図 F-1 に示すように、比較的広い周波数分解能（ $\Delta f=20\text{Hz}$ ）で、測定した全 143 点のデータを俯瞰すると、埋設深さが 50, 100, 150 mm に対応して、それぞれ共振周波数は、80, 100, 120 Hz とみた。また、この 80~120 Hz 域では、埋設物があることで（埋設物なしに比べ）5~7 dB ほど振れやすくなっていることがわかる。更に、図 F-2 には、埋設上の代表点（それぞれ 3 点）を抜き出してみたが、埋設の深さの違いにより共振周波数の変化が確認できた。

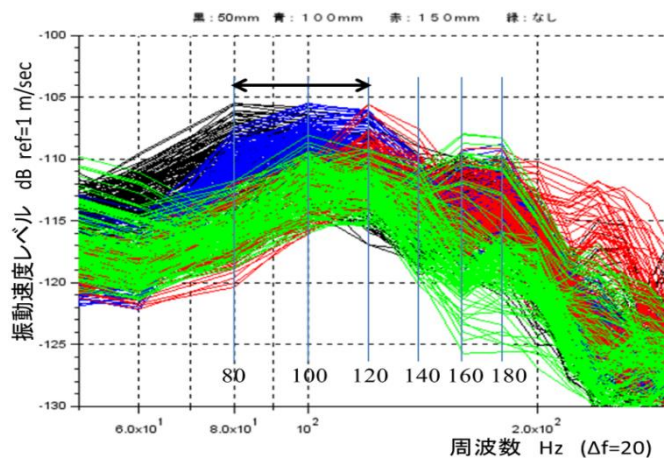


図 F-1 全データ重ね書き(黒:50mm,青:100,赤:150,緑:なし)

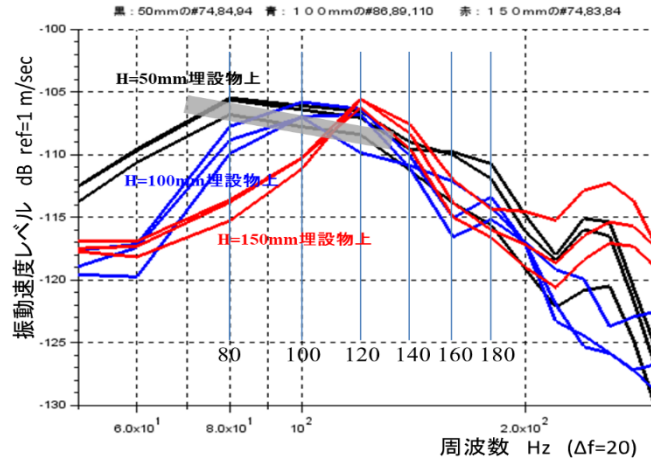


図 F-2 埋設物上代表 3 点の特性(黒:50mm,青:100,赤:150)

以上は、比較的広い周波数分解能 ( $\Delta f=20$  Hz) でみたが、より詳しくみるため、 $\Delta f=5$  Hz で分析した結果を図 F-3 に示す ( $\Delta f=10$  Hz は参考として、図 G-1 に示す)。結果、共振と見られるピークは上記の 3 周波数以外にも確認でき、振動はもう少し複雑であることがわかる。おおよそ、埋設深さ毎の共振は以下の領域にある。

埋設深さ 50 mm ; **75 Hz(大)**、90 Hz(中)、115 Hz(小)

埋設深さ 100 mm ; **90 Hz(大)**、120 Hz(中)

埋設深さ 150 mm ; 80 Hz(小)、**125 Hz(大)**

ここで、 $120\pm 5$ Hz 域には 3 仕様と共振をもつことがわかる。もっとも、埋設物がなくても、 $100\sim 130$  Hz 域には (埋設物有りよりも振動レベルは  $5\sim 7$  dB 小さいものの) 共振があり、土壌としても固有の振動特性とみる (図 G\_2 参照)。

$\Delta f=5$  Hz の分析により、最大レベルの共振の詳しい周波数は、埋設深さ 50 mm で 75 Hz、埋設深さ 100 mm で 90 Hz、埋設深さ 150 mm で 125 Hz と確認できたので、以降、これらの 3 つの共振に焦点をあて、参考文献との差を詳しく分析する。

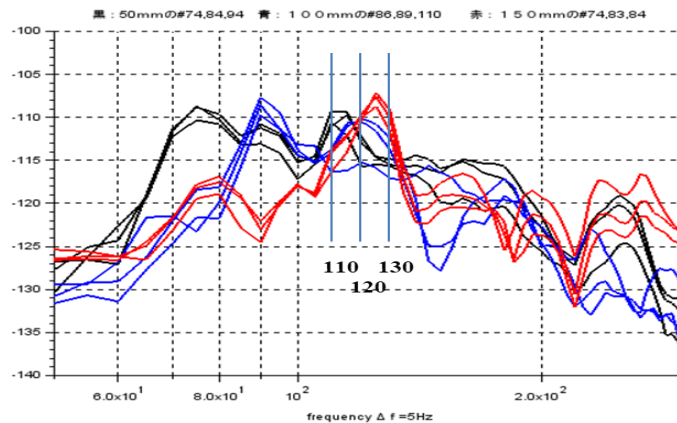


図 F-3 図 F-2 詳細 (2)  $\Delta f=5$ Hz 分析(黒:50mm,青:100,赤:150)

**(参考文献の実験結果俯瞰)**

参考文献[F1]では、その 2711 ページに以下のように記しており、当方の実験結果と対照的である。 別途、彼我の差を表 F-1 に示すが、鍵となる部分は以下の点とみた。

- 埋設物；対戦車用地雷 VS1.6(Google で詳細あり、図 F-4 に添付)
- 土壌；gravel (砂利) とだけ記載 (粒状など説明はない)。

ISO 14688 grades gravels as fine, medium,  
and coarse with ranges 2 mm to 6.3 mm to 20 mm to 63 mm.



Specifications  
Weight: 3 kg  
Explosive content: 1.85 kg  
Diameter: 222 mm  
Height: 92 mm  
Operating pressure: 180 to 220 kg

**出典 ; wikipedia**

A soldier examines two upside-down VS-1.6 mines in Iraq.

図 F-4 参考文献の実験の埋設物 (地雷)

- 埋設深さ(H)と共振周波数の関係 ; 添付図 5 (参考文献の FIG.9.) から次のように読み取った

H=0 236Hz (但し、Table1 には 230Hz と記載あり)

H=25mm 162Hz

H=75mm 115Hz

ここで、H=0 の場合の共振は、地雷のプレッシャープレート単独の共振である。

共振のメカニズムについては 2711 ページの下記の説明 (参考文献 F1) と、添付図 F-6 (参考文献 F1 の FIG.1.) のモデルから地雷上の筒状の土壌の可動質量 ( $M_s$ ) が 1 自由度の振動をしており、深さと共に質量は増大し (加えて、深さと共に、可動質量の横部の剪断剛性  $K_{s1}$  の増加、可動質量本体の圧縮剛性  $K_{s2}$  の低下) より、シンプルに説明できている。

## 2. Effect of mine's burial depth

Analysis of the developed model shows that the mine's depth is an important parameter affecting the resonance frequency of the mine/soil system and, most importantly, the magnitude of the system impedance. The lower the impedance of the mine/soil system, the greater the contrast with surrounding soil, and, as a result, the easier to find the mine. As the depth increases, the resultant impedance tends to increase as well, thus reducing the contrast. **Figure 9(a)** demonstrates this effect for AT mine VS1.6, buried in

gravel at 0 m, 25 mm, and 75 m. Figure 9(b) shows similar results calculated using the spring-mass model and the mine parameters from the Table I. In the calculations we used depthdependent soil parameters defined by formulas (1) and (3):  $M_S \sim H$ ,  $K_{S2} \sim H^{-1}$ ,  $R_{S1} \sim H$ , and  $R_{S2} \sim H$ . For shear stiffness  $K_{S1}$ , however, the dependence  $K_{S1} \sim H^{0.5}$  is better fitted with the experimental data. The dependence  $K_{S1} \sim H$ , introduced by the formula (2), is based on the assumption that the shear stress is developed between the side surface of the soil column above the mine and the surrounding soil. In fact, the stress is distributed within the soil, so the resultant effective shear force may have more complicated dependence with the depth.

赤線と赤字は追記したもの

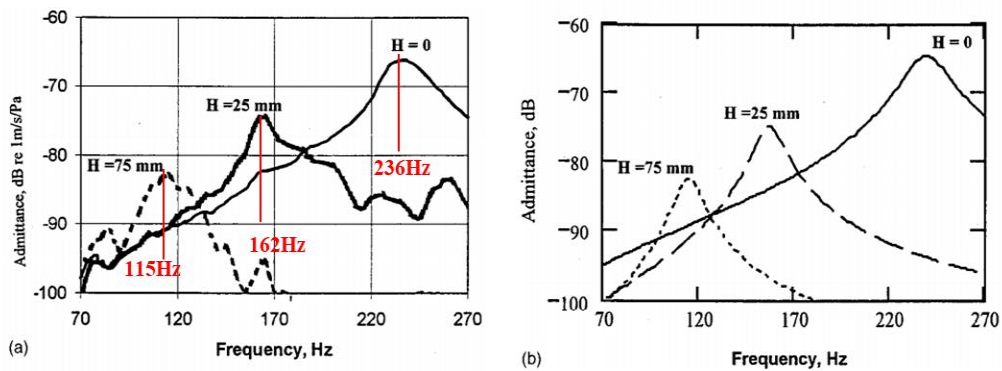


FIG. 9. Impedance dependence on mine burial depth: (a) field data for AT mine VS1.6; (b) calculated data for the same mine.

図 F-5 埋設深さ(インピーダンス)と共振周波数の関係 (a)実験 (b)計算  
(参考文献 F1 より)

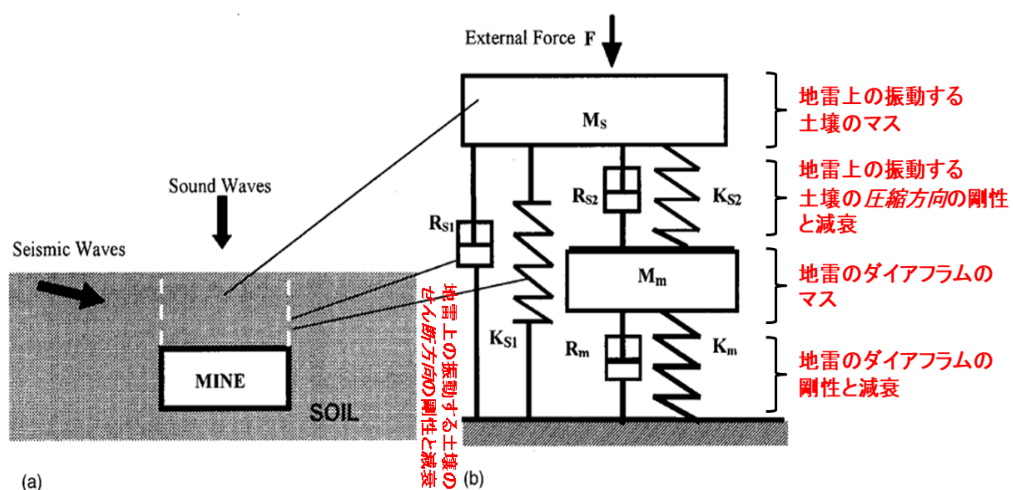


FIG.1. Mine buried in soil and excited with sound or seismic waves (a), and an equivalent mechanical (dynamical) diagram of this mine/soil system (b)

図 F-6 振動モデルの策定 (参考文献 F1 より、赤字部は追記したもの)

**(詳細比較)**

以上の結果を踏まえ、埋設深さと共振周波数の関係が、彼我で逆の傾向となる理由を推定するため、文献からの情報を集約結果、ならびに計算をおこない表 F-1 としてまとめた。

以下、主としてこの表をベースに、埋設深さと共振周波数の関係が、彼我で逆となる要因になりうる差異ある部位、要素について考察していく。主な違いは以下の 4 点である；

- 1) 土壌：砂利と赤土の差がある。比重、粘性などの差はあるが埋設深さと共振周波数の傾向が逆転するとは考えにくい。
- 2) 埋設物の形状と剛性：地雷の場合、土壌と共に動く可動部 (pressure plate)、即ち受圧部がプランビュー面積の約 30% と小さいのが特徴である。対して、ホーローはフランジの部分はややあるが、プランビュー面積のほとんどで受圧する。  
また、地雷の下面はリブ付きのプラスチックであり、上面より剛性が高いとみる。ホーローの下面は柔らかな蓋であり剛性は低い。  
後で、図 F-5 のアドミタンス特性を使った比較でも論議するが、この形状と、下部の剛性の差が、埋設深さと共振周波数の傾向に影響している可能性が高い。  
上面の面剛性：文献には地雷のプレッシャープレートの剛性値 ( $2.5 \times 10^7$  Pa/m) あり比較をするため、使用したホーロー容器の剛性を計算した。詳細は付録の計算 1 に記載したが、ホーローの面剛性 ( $3.2 \times 10^7$  Pa/m) は地雷よりやや高い値である。主に、周辺の支持構造が違うため (地雷；ピン支持、ホーロー；固定支持) である。なお、ホーローの場合、通常の剛性 (=面剛性に面積をかける) は 82 kgf/mm で、大人一人が上に乗って約 1 mm の変位する程度である。
- 3) 土壌の振動部の形状：文献では図に示していないが、可動部は円筒形状であると記している。一方、ホーローの場合 (図 G-3 より) も概略は円筒形とみられるがホーローの底面よりやや広い規模である。赤土の凝集力により (せん断力で) 周辺部に振動が伝わりやすくなったものとみる。但し、振動形状に多少の差があったとしても、上述の共振周波数の逆転が起きるとは考えにくい。
- 4) 評価指標：現在、指標が両者で違う。そこで、同じ評価ができれば詳しい差が見えると考えた。今回、図 F-5 に示した参考文献にある伝達関数のアドミタンス (= [土壌表面振動速度]/[土壌表面上の音圧]) に合わせるため、当方のデータを以下の仮定にもとづき処理を行った。  
(仮定) アドミタンスの分母である、[土壌表面上の音圧]として、別実験で測定した土壌上部音 (高さ、100 mm 程度) で代替が可能である。  
(処理) 今回の送信波形は、50-200Hz\_wd1.4s\_chF25Hz\_pd20ms\_intT200ms (シングル)で、土壌上部音を測定したときの、送信波形は 50-152 Hz のため、  
伝達関数  $H(\omega) = \text{土壌上部音 } 50-152\text{Hz}(\omega) / \text{送信波形 } 50-152\text{Hz}(\omega)$

をいったん計算し、

土壌上部音 50-200 Hz( $\omega$ )の予測値= $H(\omega)$ \*送信波形 50-200 Hz( $\omega$ )

で算出した。

以上の処置より、当方のホーローを深さ H=50 mm に埋設した時のアドミタンスを計算し、図 F-5 に赤線で記した。結果、以下のことがわかる。

- ① ホーローではアドミタンスが低周波（75 Hz 付近）において地雷より高い。即ち、剛性が地雷より低い。仮に直径をホーローの  $\Phi 190$  として等価剛性をみると、

ホーロー 400 N/mm < 地雷 600 N/mm      地中

であり、表 F-1 に単品での面剛性として示した

ホーロー (3.2×10<sup>7</sup> Pa/m) > 地雷 (2.5×10<sup>7</sup> Pa/m)      単品

と、地中では剛性が逆転することである。また、上述したようにホーローの単品剛性は 82 kgf/mm (=808 N/mm) であり、ホーローは地中では大幅に剛性を失うことがわかる。

表 F-1 彼我の実験条件、特性などの詳細比較

	Steven Institute of Tech, New Jersey	桐蔭横浜大学	桐蔭横浜の特徴
			
実験日時場所	June. 2001 米陸軍の野外実験場	18th August 2020 厚木佐藤工業研究所	
土壌	gravel(砂利)を紹介; sandy(砂質)も実施	赤土	赤土(粘性大か?)
埋設物	対戦車地雷 VS-1.6	ホーロー容器(底面が上)	
形状、寸法	プランビュー $\Phi 222$ 上面;可動部は $\Phi 125$ 程度 下面;リップ付きプラスチック	プランビュー $\Phi 180$ 上面;可動部も $\Phi 180$ 下面;樹脂の蓋	可動、受圧面積大 支持剛性低
材料	t=12mm プラスチック	t=0.84(実測 鋼+ホーロー)	
面剛性(Pa/m)	2.5×10 <sup>7</sup> (TABLE1記載) ピン支持	3.2×10 <sup>7</sup> (高木計算1参照) 固定支持	剛性やや高いよう
共振(埋設無し単体)	220Hz(または図より読み取り236Hz)	257Hz(高木計算2参照)	周波数やや高い
土壌の振動部の形状	埋設物直径の筒状(記載のみ記載なし)	埋設物直径かやや大きい(H=50mm)(図A.3参照)	振動領域やや大かも
深さ(mm)	0, 25, 75を紹介 (最大130まで実施)	50, 100, 150	やや深めまで実施
入力	スピーカ(詳細説明なし) 周波数スイープ	平面スピーカ 50-200Hz_wd1.4s_chF25Hz_pd20ms_intT200ms (シングル)	
出力と測定器	土壌表面速度(V) with a LDV 土壌上10mm位置騒音(P)	土壌表面速度(V) with a LDV -(別実験での土壌上騒音を一部使用)	
測定周波数域	70~520Hz	50~200Hz	
評価指標	インピーダンス Z=P/V またはアドミタンス V/P	表面速度(V)	
深さvs共振周波数(f0)	0mm→236Hz(実測) 25mm→162Hz(実測) 159.2Hz(高木計算) 75mm→115Hz(実測) 91.9Hz(高木計算3参照)	50mm→75(実測), 126.9Hz(高木計算3参照) 100mm→95(実測), 89.7Hz(高木計算) 150mm→125(実測), 73.2Hz(高木計算)	H=50mmが計算より大幅に低い
実測と計算			



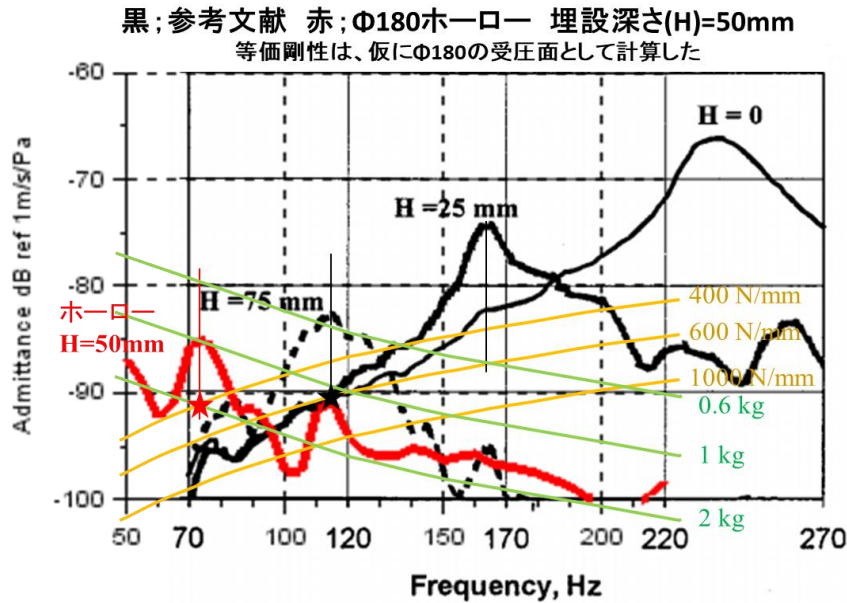


図 F-7 図 F-5 に当方のアドミタンスを上書き (赤字)

この、地中においてホーローが剛性を大きく失うことが、共振周波数の逆転の主要因であると推測している。では、剛性を失う（それも浅い埋設深さ 50 mm の場合）理由については検証実験が必要であるが、現時点では以下の点が要因として考えられる。

『ホーローは、高い振動受圧（もしくは大きな速度振幅時には）と、マイクロなスリップを起こし動いてしまうため、高い剛性を保持できない』

これにより、これまで見てきた次の事象が説明できる。

- ① 地雷では起きない？；表 F-1 に示すように、地雷は受圧面積の割には土との接触面積がホーローより大幅に大きく、更に下面の剛性もホーローより大のため。
- ② 埋設深さが 50 mm で起きやすいのはなぜか？ ホーローの上面での受圧は埋設深さが浅いほど（中間にある土壌の質量が小さく）大きいため。  
また、振動する土壌の側面でのせん断剛性、減衰（図 F-6 の KS1 と RS1）も 100、150 mm の場合より小さい。

速度でも、（ホーロー上面で振動する）土壌の速度は浅いほど大きく、ある速度値をしきい値として、ホーロー側面と土壌の間にスリップが起きるとみる。特に、上述のせん断剛性の低い 50 mm 時は起きやすい。  
これは、摩擦の特性[参考文献 F3]から説明されるのではと考える。

#### (まとめ)

埋設深さと土壌の共振周波数の傾向について、参考文献と相容れない結果があったので、彼我の詳細分析を行った。その結果、ホーロー容器の場合、例えば、埋設深さ 50 mm

の地中では大幅に剛性を失っており、共振周波数を低下させていることがわかった。また、そのメカニズムとしては、ホーロー容器の支持剛性が低く、高い振動受圧を受ける場合、マイクロなスリップを起こしているためと推測される。ただし、これについてはさらなる検証が必要であると思われる。

#### (参考文献)

- [F1] Nonlinear seismo-acoustic land mine detection and discrimination  
Dimitri Donskoy et al., Stevens Institute of Technology,  
711 Hudson Street, Hoboken,  
New Jersey 07030 [DOI: 10.1121/1.1477930]
- [F2] 機械振動 亙理 厚 丸善株式会社 65 ページ
- [F3] まさつの物理 松川 宏, 生産と技術 第50巻 第4号(1998)

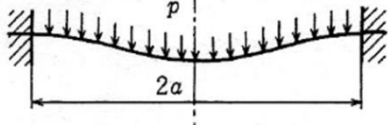
### G ホーロー容器の共振周波数について

#### (計算1)

ホーロー容器の動的剛性 (Pa/m) について求める。

まず、円板は周辺を固定され、面内に等分布の荷重( $p$ )がはたらくものとする。この場合、中心から半径  $r$  部における変位( $w$ )は、機械工学便覧の材料力学の章から、以下のようになる。

円板, 周辺固定, 等分布荷重



$$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$$

$$w_{\max} = (w)_{r=0} = \frac{pa^4}{64D} = 0.171 \frac{pa^4}{Eh^3}$$

図 G-1 周辺固定時の円板の変位

ここで、本モデルのため単純化するものとして、面内の平均変位( $w_{ave}$  とおく)を考える。この場合、変位の半径方向の平均をとればよいから、以下のよう求めた。

$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$  の平均値を求める

$y = \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$  とする

$$J_{ave} = \frac{\int_0^a \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 2\pi r dr}{\pi a^2}$$

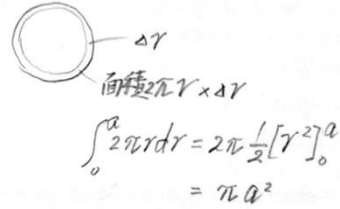
$$= \frac{2\pi}{\pi a^2} \int_0^a \left(r - \frac{2}{a^2}r^3 + \frac{r^5}{a^4}\right) dr$$

$$= \frac{2}{a^2} \left\{ \frac{1}{2}[r^2]_0^a - \frac{2}{4a^2}[r^4]_0^a + \frac{1}{6a^4}[r^6]_0^a \right\}$$

$$= \frac{2}{a^2} \left( \frac{1}{2}a^2 - \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{6}a^2 \right)$$

$$= \frac{1}{3}$$

よって、 $w$  の平均値は  $w_{max}$  の  $1/3$



ここで、 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  であるから

$$w_{ave} = \frac{1}{3} \frac{pa^4}{64D} = \frac{1}{16} \frac{(1-\nu^2)}{Eh^3} pa^4 \dots \dots (G1)$$

である。

よって、ここで単位圧力  $P=1$  (pascal) についての面剛性  $Ka$  (バネ定数: 単位 N/m) は (G1) 式で  $P=1$  として逆数をとればよく

$$Ka = \frac{16}{(1-\nu^2)} \frac{Eh^3}{a^4} \dots \dots (G2)$$

となる。

ホーローの場合、 $\Phi=180\text{mm}$  (半径  $a=0.09\text{ m}$ ), ポアソン比 $=0.3$ , ヤング率は鉄の部分として  $200\text{ Giga Pascal}=2 \times 10^{11}$  (Newton/meter), 厚み  $h=0.84\text{mm} \rightarrow 8.4 \times 10^{-4}$  meters としてみると  $3.177 \times 10^7\text{ Pa/m}$  (→表 F-1 に記載) となる。

### (計算 2)

ホーローの底板の共振周波数  $f_0$  を求める。

境界条件として、周辺固定とする。ここで以下の公式[参考文献 F2]を使う。

$$f_0 = 10.17 * \frac{1}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}$$

$a, E, \nu$  は計算 1 と同じく、それぞれ半径、ヤング率、ポアソン比である。また、 $\rho$  は密度で、鉄の場合、 $7800\text{ Newton Sec}^2/\text{m}^4$  であり、 $10.17$  は周辺固定の場合の運動方程式の根 (ベッセル関数) である。

これから、共振周波数  $f_0$  は 257Hz となる。

### (計算 3)

参考文献のモデルのように、地雷のプレッシャープレート上（ホーローの場合、底板）の上の土壌を円筒形と考え、この部分が可動マスとして振舞う場合の共振周波数を計算する。この場合、プレッシャープレート（底板）の剛性をバネとして計算すればよいから、

$$\text{可動マス (質量 kg) } M = 1000\rho \cdot \pi a^2 \cdot H$$

ここで、 $\gamma$  は比重、 $a$  は半径(m)、 $h$  は埋設深さ(m)である。

剛性  $k$  は面剛性  $Ka$  に実面積  $\pi a^2$  をかければよい。即ち

$$\text{剛性 } K = Ka \cdot \pi a^2$$

よって、共振周波数  $f_0$  は

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

具体例として、参考文献の埋設深さ  $H=75\text{mm}$  時と、当方の埋設深さ  $H=50\text{mm}$  時の共振周波数を求める。

まず参考文献の埋設深さ  $H=75\text{mm}$  時は、

比重  $\gamma$  は仮に 1 とし、半径  $r=0.111\text{m}$   $H=0.075$  (m)より、質量  $M$  は

$$\begin{aligned} M &= 1000 \cdot 1 \cdot 3.1416 \cdot 0.111^2 \cdot 0.075 \\ &= 2.093 \text{ kg} \end{aligned}$$

$Ka$  は文献の TABLE1 から、Mine type が VS-1.6 の Dynamic Stiffness  $2.5 \times 10^7$  (Pa/m) から

$$\begin{aligned} K &= Ka \cdot \pi a^2 \\ &= 2.5 \cdot 10^7 \cdot 3.1416 \cdot 0.111^2 \\ &= 9.677 \cdot 10^5 \text{ Newton/m} \end{aligned}$$

よって、共振周波数  $f_0$  は

$$\begin{aligned} F_0 &= 1 / (2 \cdot 3.1416) \cdot \text{sqrt}(9.677 \cdot 10^5 / 2.903) \\ &= 91.9 \text{ Hz} \end{aligned}$$

となる。

同様に、当方の埋設深さ  $H=50\text{mm}$  時は、

比重  $\gamma$  は同じく仮に 1 とし、半径  $r=0.090\text{m}$   $H=0.050$  (m)より、質量  $M$  は

$$\begin{aligned} M &= 1000 \cdot 1 \cdot 3.1416 \cdot 0.090^2 \cdot 0.050 \\ &= 1.2723 \text{ kg} \end{aligned}$$

$Ka$  は、計算 1 のとおり、 $3.177 \times 10^7$  (Pa/m)から

$$\begin{aligned} K &= Ka \cdot \pi a^2 \\ &= 3.177 \cdot 10^7 \cdot 3.1416 \cdot 0.090^2 \\ &= 8.0845 \cdot 10^5 \text{ Newton/m} \end{aligned}$$

よって、共振周波数  $f_0$  は

$$F_0 = 1 / (2 * 3.1416) * \sqrt{8.0845 * 10^5 / 1.2723}$$

$$= 126.9 \text{ Hz}$$

となる。

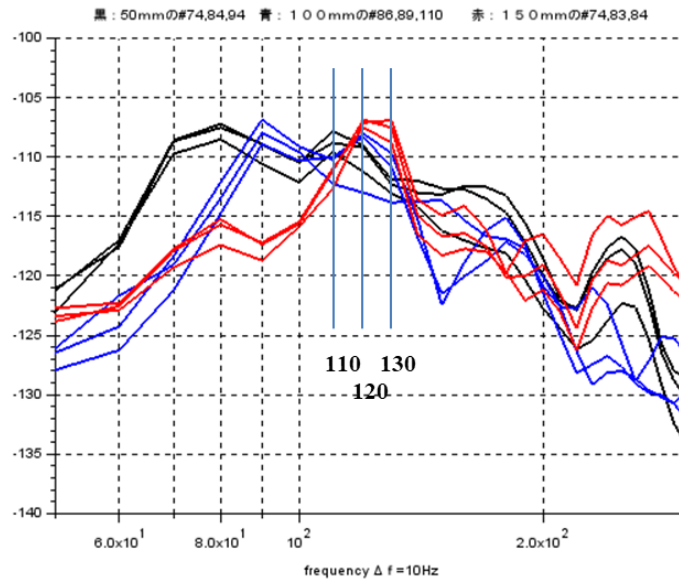


図 G-1 図 F-2 の詳細 (1)  $\Delta f=10 \text{ Hz}$  分析(黒:50mm,青:100,赤:150)

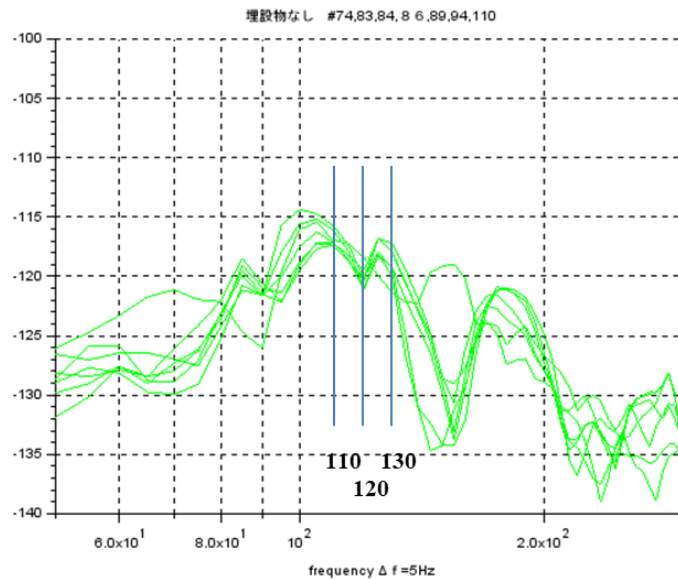


図 G-2 図 F-2 の詳細 (2)  $\Delta f=5 \text{ Hz}$  分析埋設物なし

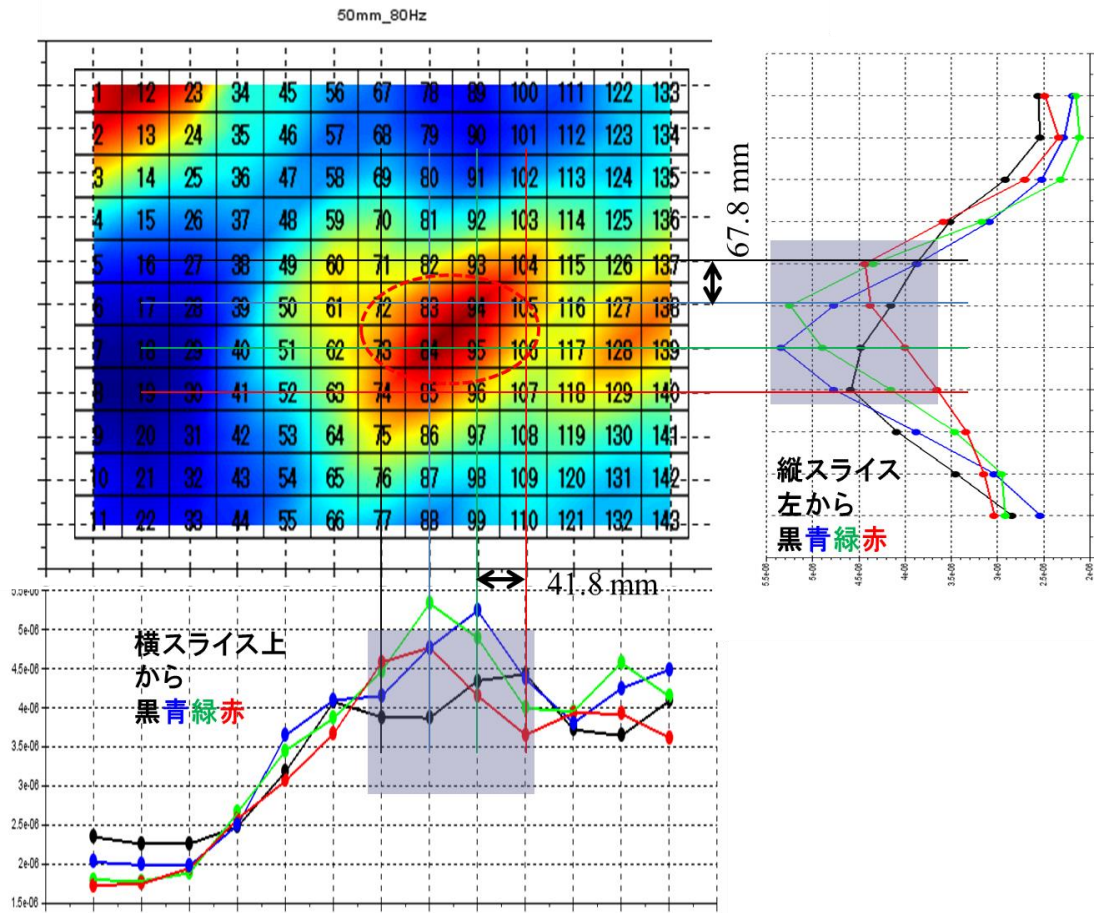


図 G-3 埋設深さ 50mm 80 Hz 振動のレベルと規模

## H レーザ軸方向振動速度に及ぼす振動速度分布とレーザ入射角の影響

図 H-1 に、珪砂実験時の振動速度分布図を示す。図より周囲よりも振動速度が大きい個所が確認できる。図中の白い円は、この周囲より振動速度が大きい個所を、埋設物の大きさである約 100 mm 程度の直径の円で囲んだものである。この円の位置が埋設物の検出位置であるが、この領域内のさらに振動速度の大きい個所は白い円の中心から、わずかに下にあることがわかる。この原因は、砂表面上の振動速度分布（垂直方向）とレーザの入射角度による影響が考えられる。

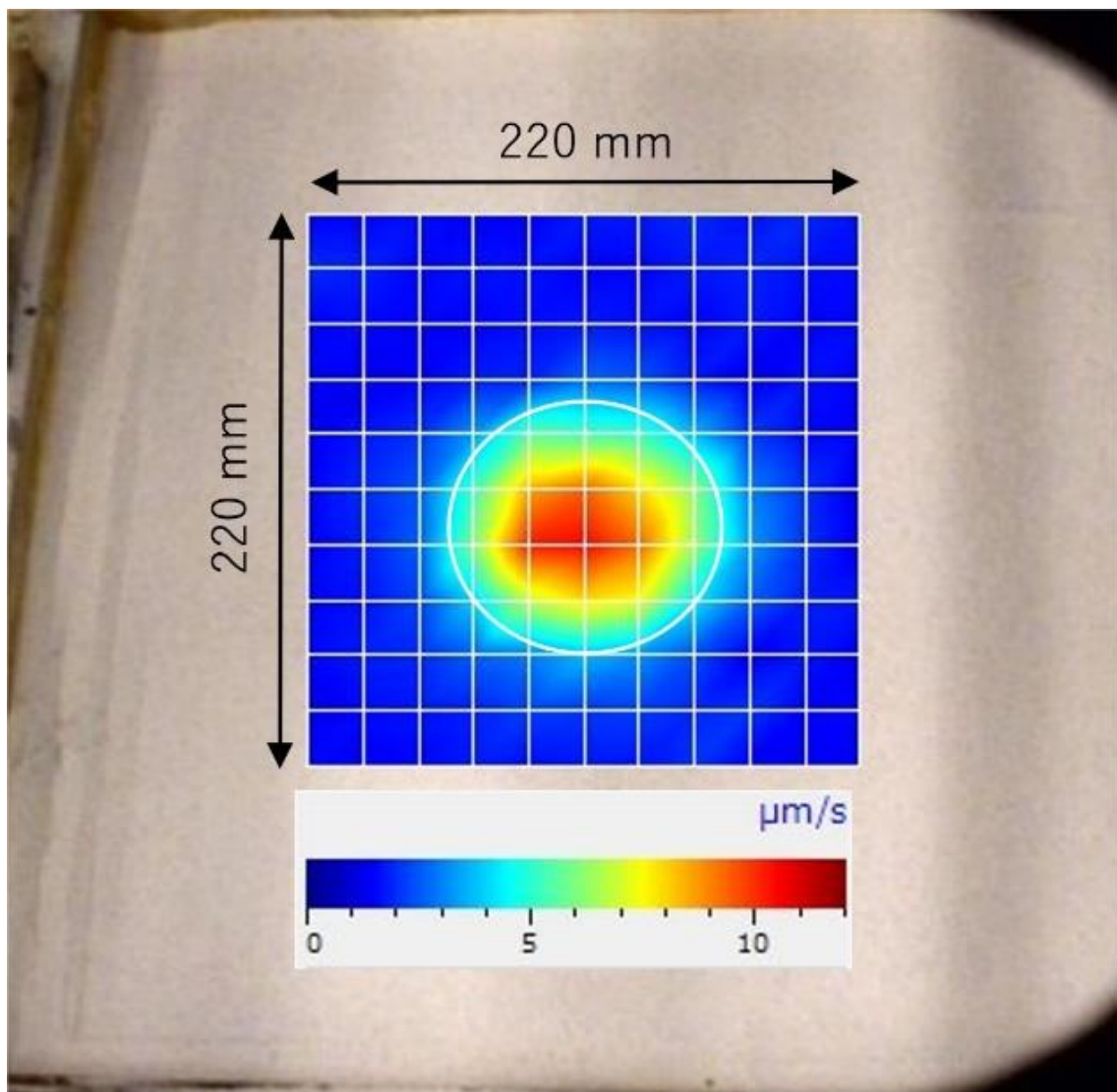


図 H-1.中空円形容器（直径 100 mm、深さ 50 mm）の検出結果例  
（149 Hz での振動速度分布）。

そこで、レーザ軸方向振動速度に及ぼす振動速度分布とレーザ入射角の影響に関する理論計算を行った。図 H-2 に示すように、測定面の振動速度分布（垂直成分）は  $V(x)$  であり、測定点に対する SLDV レーザービームの入射角は  $\theta(x)$  ( $x$  は 埋設物の中心からの地表面上の距離、垂直入射は 90 度)。このとき、測定位置  $x$  でのレーザビームの軸方向成分の振動速度  $V_L(x)$  は、式 (H1) で表すことができる。

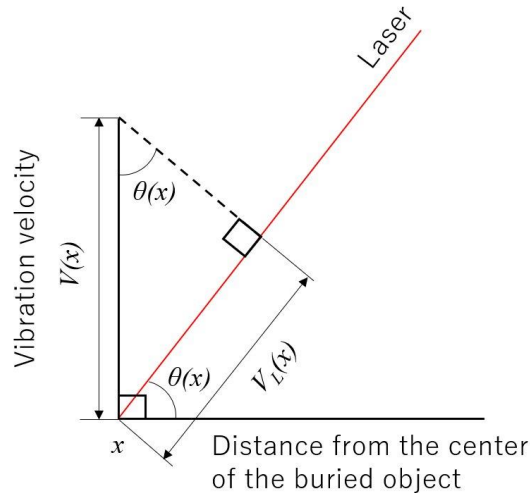


図 H-2. 入射角とレーザ軸方向振動速度の関係。

$$V_L(x) = V(x) \cdot \sin\{\theta(x)\} \quad (\text{H1})$$

円形の埋設物体の曲げ共振の振動速度分布（垂直成分）を余弦波で近似できると仮定すると、 $V(x)$  は式 (H2) で表すことができる。

$$V(x) = V_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{r}\right) \quad (\text{H2})$$

ここで、 $V_m$  はたわみ共振中心の振動速度の最大値、 $r$  は埋設物の半径、 $x$  は測定位置 ( $-r \leq x \leq r$ ) である。したがって、半径  $r$  の埋設物の任意の位置での軸方向の振動速度は、式 (H3) で与えられる。 $\theta(x)$  は測定位置  $x$  ごとに変化する。

$$V_L(x) = V_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{r}\right) \cdot \sin\{\theta(x)\} \quad (\text{H3})$$

珪砂実験セットアップでは、SLDV から埋設物の中心までの距離を 836 mm、地表面から SLDV までの高さを 732 mm とすると、レーザビームの中心に対する入射角は埋められたオブジェクトは約 61.1 度となる。もし、直径 100 mm の円形埋設物上の砂層部が、たわみ共振により振動していた場合、埋設物上における SLDV に近づく方向および遠ざかる方向のレーザ軸方向振動速度の変化は (H3) 式で計算することができる（簡単にするために  $V_m = 1$ ）。計算結果例を図 H-3 (a) に示す。レーザ軸方向振動速度の最大値は、埋設物の中央部より上で測定されていることがわかる。



一方、図 H-3 (b) は、埋設物の中心付近にのみ均一な振動分布を与えた場合の計算結果の例を示している（ここでは、中心から $\pm 15\text{mm}$  の範囲の振動速度は一定に保たれ、その後徐々に減少させた）。均一な振動分布が得られる範囲では、レーザの軸方向振動速度は、SLDV に近づくにつれて増加し、離れるにつれて減少する傾向があることがわかる（SLDV に近づく方向がプラス側）。曲げ振動の場合、レーザ軸方向振動速度の最大値が埋設物の中心から SLDV に向かって移動するためには、埋設物の半径約  $250\text{mm}$  以上が計算上必要となる。

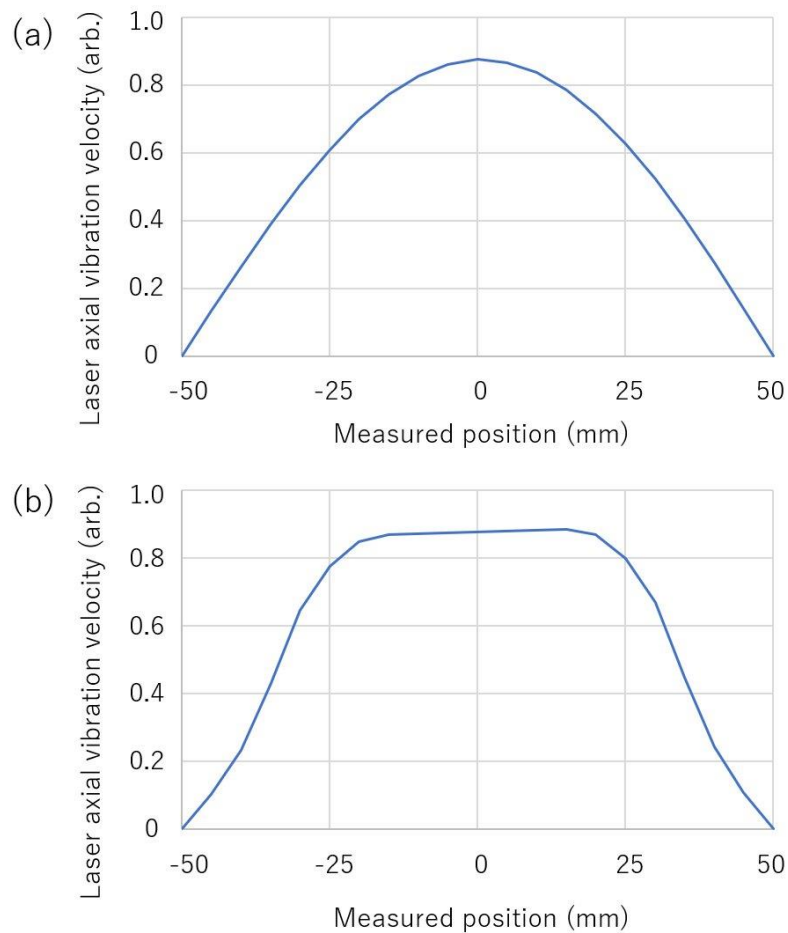


図 H-3. 埋設物（半径  $50\text{mm}$ ）に基づくレーザ軸方向振動速度の計算例.

(a) たわみ振動分布を与えた場合、(b) 均一分布を与えた場合（中心から $\pm 15\text{mm}$  以内）。



令和 2 年度 防衛装備庁  
安全保障技術研究推進制度

## 研究成果報告書

UAV を用いた音波照射加振による浅層地中探査技術の基礎研究

### 別冊

非公開とする理由：

音源搭載型 UAV の音源マウント部の傾斜支持に関する箇所の特許性が認められたため。

非公開とする箇所：

91 頁（遮断量の見積もり）～95 頁

97 頁（背景と課題）

非公開期間：令和 3 年 8 月 1 日まで

令和 3 年 5 月

桐蔭横浜大学（学校法人桐蔭学園）

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、学校法人桐蔭学園が実施した令和2年度「UAVを用いた音波照射加振による浅層地中探査技術の基礎研究」の成果を  
取りまとめたものです。

## 目 次

1. 委託業務の目的	1
1.1 研究課題の最終目標	1
1.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題	1
1.3 要素課題に対する攻略手段と実施項目及びそのための体制	2
2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度	3
2.1 探査深度について	3
2.2 探査精度について	3
2.3 探査距離について	3
3. 委託業務における研究方法及び成果	4
3.1 埋設物試験場の設計製作	4
3.1.1 厚木の埋設物試験場（珪砂、シルト土、赤土）	4
3.1.2 つくばの埋設物試験場 1（シルト土）	5
3.1.3 つくばの埋設物試験場 2（関東ローム土、赤土）	6
3.1.4 まとめ	7
3.2 市販音源を用いた音波照射による地表面振動の計測	8
3.2.1 珪砂の場合	8
3.2.2 ローム土の場合	22
3.2.3 シルト（つくば表層土）の場合	51
3.2.4 赤土の場合	60
3.2.5 まとめ	78
3.3 照射音波波形の最適化による計測速度の改善	79
3.3.1 計測速度の改善	79
3.3.2 埋設物の大きさに応じた周波数と加振力の調整	81
3.3.3 加振力の違いが映像結果に及ぼす影響	84
3.3.4 まとめ	87
3.4 UAV を用いた計測システムの構築	88
3.4.1 試作した音源搭載型 UAV の概要と計測システムの構築	88
3.4.2 UAV の改良と検証	90
3.4.3 まとめ	101
3.5 構築した計測システムを用いた埋設物試験場での計測	102
3.5.1 UAV 飛行時の基礎実験	102
3.5.2 UAV 着陸時の基礎実験	114

3.5.3 UAV 改良による効果.....	119
3.5.3 まとめ.....	127
4. 委託業務全体の成果.....	128
4.1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果.....	128
4.2 研究課題の発展性（間接効果を含む）.....	129
4.3 研究成果の発表・発信に関する活動.....	129
5 プロジェクトの総合的推進.....	129
5.1 研究実施体制とマネジメント.....	129
5.2 経費の効率的執行.....	129
6 まとめ、今後の予定.....	130
6.1 本研究により得られた成果.....	130
6.2 今後の予定.....	131
7. 研究発表、知的財産等の状況.....	132
7.1 研究発表等の状況.....	132
7.2 知的財産等の状況.....	132
7.3 その他特記事項.....	132
謝辞.....	132
付録.....	134
A 陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性について.....	134
B 陸装研・管理土槽室にて 2019 年 8 月に実施した実験内容表.....	135
C 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーについて.....	136
D UAV を着陸させた状態の計測について.....	137
E メディアンフィルターについて.....	139
F 埋設物があることによる共振周波数の変化について（実際の地雷との比較）.....	140
G ホーロー容器の共振周波数について.....	147
H レーザ軸方向振動速度に及ぼす振動速度分布とレーザ入射角の影響.....	152

# 1. 委託業務の目的

## 1.1 研究課題の最終目標

本研究では、音源搭載型 UAV (Unmanned Aerial Vehicle) からの音波照射加振による浅層地中探査の実現を目的とした、非接触音響探査法の基礎研究を実施する。このため、3年間の研究において、まず、埋設物試験場を構築した上で、様々な市販音源を用いた音波照射による地表面の振動を長距離レーザドップラ振動計 (LDV : Laser Doppler Vibrometer) を用いて計測し、地表面の振動速度分布やその時間変化より計測原理や探査条件等を明らかにするとともに、浅層地中探査に必要とされる音源等の機材の選定を行う。次に、選定した音源を搭載した UAV の試作を行い、無線制御による音波照射及び LDV との協調計測システムを構築する。埋設物試験場にて実際に計測を行い、照射音波波形の最適化を行うとともに、UAV を用いた音波照射加振による浅層地中探査法における広範囲計測及び計測速度に関する知見を得ることを目標とする。

本研究において最終目標とする探査性能は、以下のとおりである。

- ・探査可能深度：0～300 mm 程度（音源の音圧依存）
- ・探査精度（最小探知物の大きさ）：直径 100～300 mm 程度（計測点の密度に依存）
- ・探査距離：100 m 程度（長距離 LDV の性能に依存）

## 1.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1) で示した最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題は以下の通りである。

### ① 音波照射加振による浅層地中探査の計測原理や探査条件等の解明

音波照射加振を用いて浅層地中に振動エネルギーを与えた場合の地表面の振動速度分布やその時間変化から、埋設物の探査を実現するための計測原理や探査条件等を解明することが課題となる。また、埋設物の大きさ、あるいは深さ及び照射音波の周波数との間関係性を明らかにする。

### ② 照射音波波形の最適化による計測速度の改善

UAV の飛行時間は限られているため、計測を高速に行う必要があるが、音波照射の時間が短すぎると埋設物に十分な振動エネルギーを与えることが出来ない。そのため、埋設物に対して効率的に振動エネルギーを与えられるように、照射音波波形を最適化することが課題となる。照射音波波形の最適化により計測速度が改善し、限られた飛行時間で広範囲を探査できるようになることが期待される。

### 1.3 要素課題に対する攻略手段と実施項目及びそのための体制

これらの要素課題に取り組むために、桐蔭横浜大学大学院工学研究科では、②～⑥を実施する。また、佐藤工業株式会社技術研究所では、①を実施する。

- ① 埋設物試験場の設計製作（担当：佐藤工業株式会社技術研究所）  
UAV からの音波照射加振による浅層地中探査を検証するために必要な、埋設物試験場の設計及び製作を行う。
- ② 市販音源を用いた音波照射による地表面振動の計測  
（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
長距離レーザドップラ振動計を用いて、音波照射による地表面振動の計測を行い、計測原理や探査条件等を明らかにする。
- ③ 照射音波波形の最適化による計測速度の改善（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
埋設物に対して効率的に振動エネルギーを与えることができるよう、照射音波波形の最適化を図り、計測速度の改善について検討を行う。
- ④ UAV を用いた計測システムの構築（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
UAV に搭載する音源等の機材を選定するとともに、選定した音源を搭載した UAV を試作し、無線制御による音波照射システム及び LDV との協調計測システムを構築する。
- ⑤ 構築した計測システムを用いた埋設物試験場での計測  
（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
構築した計測システムを用いて埋設物試験場での計測を行い、総合的な探査性能の検証を行う。
- ⑥ プロジェクトの総合的推進（担当：桐蔭横浜大学大学院工学研究科）  
プロジェクト全体を円滑に運営していくため、研究推進委員会を適宜開催する。必要に応じて研究協力者（アドバイザー）からの意見を聞くなど、プロジェクトの推進に資する。



## 2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

研究目標毎の達成度を以下に記す。なお、今回の研究では、埋設物としてはすべて中空の円形容器を、音源としては UAV への搭載を考慮し、軽量の平面音源を用いている。

### 2.1 探査深度について

探査深度目標としては、音源の音圧に依存するものの 0~300 mm 程度であると予測した。今回の実験結果からは、探査可能深度と探査可能な埋設物の大きさにはトレードオフがあり、土壌種類や状態（含水率、締固度）や音圧にも影響されるが、おおよそ埋設物直径の約半分程度の深さが、UAV に搭載可能な平面音源で探査可能な深さであると思われる。

埋設物の直径約 300 mm の場合、探査可能な最大深度は約 100~150 mm 程度

埋設物の直径約 200 mm の場合、探査可能な最大深度は約 100 mm 程度

埋設物の直径約 100 mm の場合、探査可能な最大深度は約 50 mm 程度

すなわち、例えば直径 600 mm の埋設物であれば、深さ 300 mm でも検出できる可能性があることを意味している。また、今回の埋設物の検出周波数帯域が約 300 Hz 以下の低周波であったことを考えると、低周波に特化した大型のウーファーの方が音源として探査には適していると言える。しかしながら、その場合には音源部の重量が UAV の搭載可能なペイロードを超えてしまい、UAV により加振領域を自由に変更できるという最大の利点が失われてしまうことになるため、今回は平面音源のみを使用した（ただし、平面音源の場合、地表面までの距離に依存するが音圧としては地表面で最大 100 dB 前後程度である）。

### 2.2 探査精度について

探査精度としては、計測点の密度に依存するものの、直径 100~300 mm 程度であると予測した。本研究では、埋設物として直径 100~300 mm のものを実際に使用しており、探査可能深度は埋設物の大きさや土壌により影響を受けるものの、大きさ的にはほぼ目的を達成していると言える。ただし、この範囲外のものが計測できないというわけではなく、探査深度の項で述べたように埋設物のおよそ直径の半分程度の深さのものが検出可能である。

### 2.3 探査距離について

探査距離については、長距離 LDV の性能に依存して、100 m 程度以内であると予測した。本研究では、2019 年度の陸上装備研究所・管理土槽室にある乾燥した関東ローム土を用いて、直径 300 mm の埋設物が LDV から離隔 20 m でも検出できることを確認している。ただし、この結果は LDV ヘッドの高さが 2 m 時の結果であり、使用した LDV（赤外線レーザー 1550 nm, 10 mW）の性能を考えると、LDV ヘッドの高さを約 10 m に設定できれば、土表面へのレーザーの入射角度は 20 m 時と変わらないため、100 m の離隔であっても特に問題なく検出できると思われるため、達成しているといえる。

### 3. 委託業務における研究方法及び成果

#### 3.1 埋設物試験場の設計製作

##### 3.1.1 厚木の埋設物試験場（珪砂、シルト土、赤土）

厚木にある佐藤工業(株)技術研究所内に、今回の探査実験用として埋設物試験場(2×2×0.5 m<sup>3</sup>)を作成した。外観図を図 3.1.1.1 に示す。この埋設物試験場は屋外にあるために車輪で移動可能な屋根も併せて製作して頂いている。また、加圧は2枚のコンパネ板の裏に約20袋の砂利入り土嚢袋により行うことができる。この試験場を用いて、珪砂7号、つくばの表層土（シルト）、赤土（グラウンド土）を用いた実験が実施された。

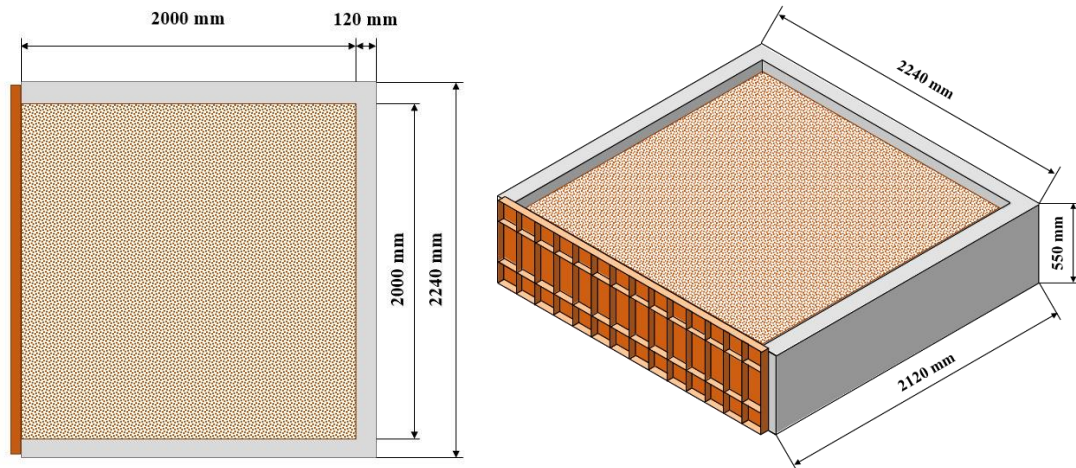


図 3.1.1.1 埋設物試験場



図 3.1.1.2 埋設物試験場の写真

### 3.1.2 つくばの埋設物試験場 1 (シルト土)

厚木に製作された埋設物試験場は、UAV を飛行させた状態での実験を行うにはやや手狭であることが問題となっていた。そのため、自由に飛行できかつ浅層地中に埋設可能な場所を探していた。幸いなことに、佐藤工業(株)技術研究所の移転地である、つくば市の造成地が短期間(2019年12月～2020年3月)であれば利用可能ということであったので、ここを臨時的埋設物試験場とした。また、実験時の時点でこの場所は人工集中地区(DID: Densely Inhabited District)ではなく、UAVの飛行許可もいない場所であったが、安全のため、造成地のほぼ中央部を試験場所としている。なお、この造成地の表層土は粘土質のシルトであった。

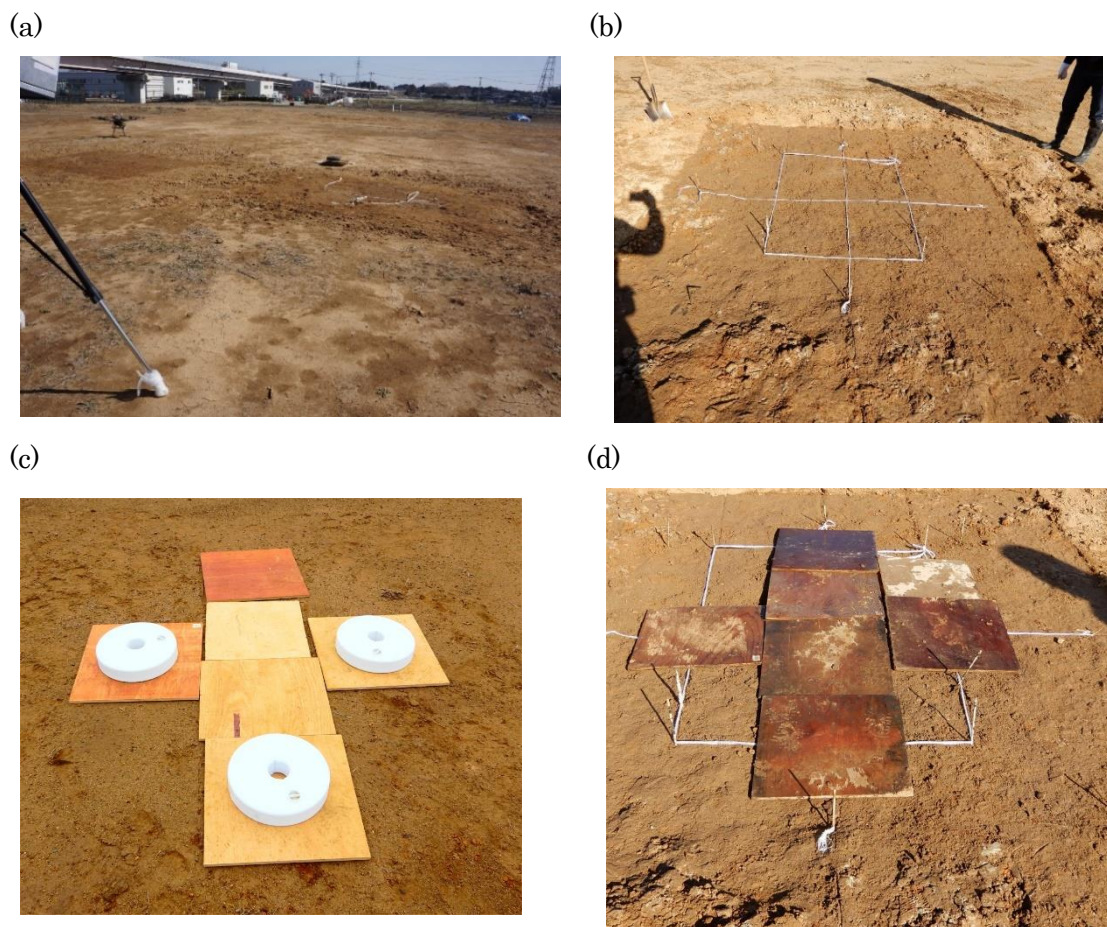


図 3.1.2.1 つくばの埋設物試験場 1 の写真

- (a) 実験場所の全景、(b) 埋設物試験場の様子 (2020年1月21日)
- (c) 埋設物の配置プラン(2019年12月17日)
- (d) 加圧板と目印用のテープとの位置関係 (2020年1月21日)

### 3.1.3 つくばの埋設物試験場 2（関東ローム土、赤土）

つくば市にある佐藤工業㈱技術研究所の移転先である造成地の一角に、探査実験用として埋設物試験場 2 ( $2 \times 2 \times 0.5 \text{ m}^3$ ) を製作した。関東ロームを用いた試験場の外観図を図 3.1.3.1 に、赤土を用いた試験場の外観図を図 3.1.3.2 に示す（寸法外観はどちらも同じ）。この埋設物試験場は屋外にあり、実験以外の時には、ブルーシートで覆い、飛ばされないようにロープと土嚢で固定して保存した。また、加圧は 2 枚のコンパネ板の裏に約 20 袋の砂利入り土嚢袋を載せることにより行うことができる。この試験場を用いて、2020 年 10 月に関東ロームおよび赤土を用いた実験が実施された。図 3.1.3.3 は、試験場の写真、および実験風景の写真である。

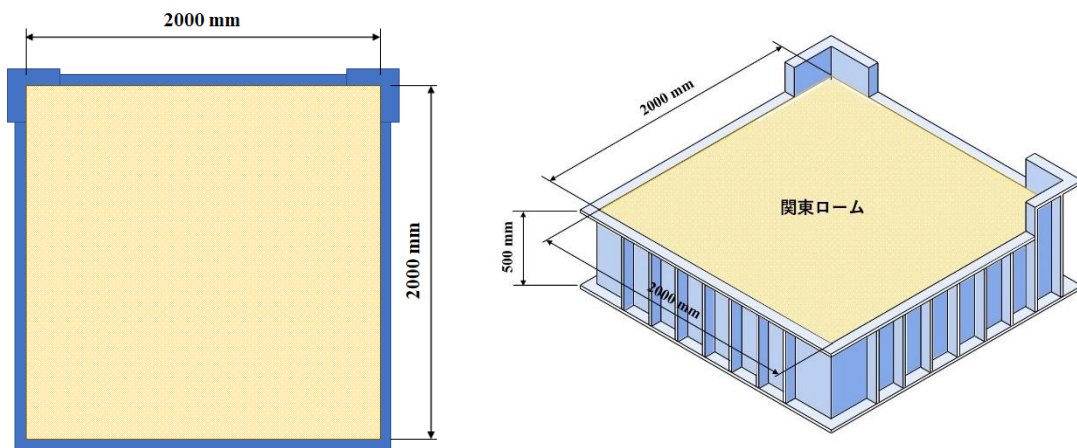


図 3.1.3.1 つくばの埋設物試験場 2（関東ローム土）

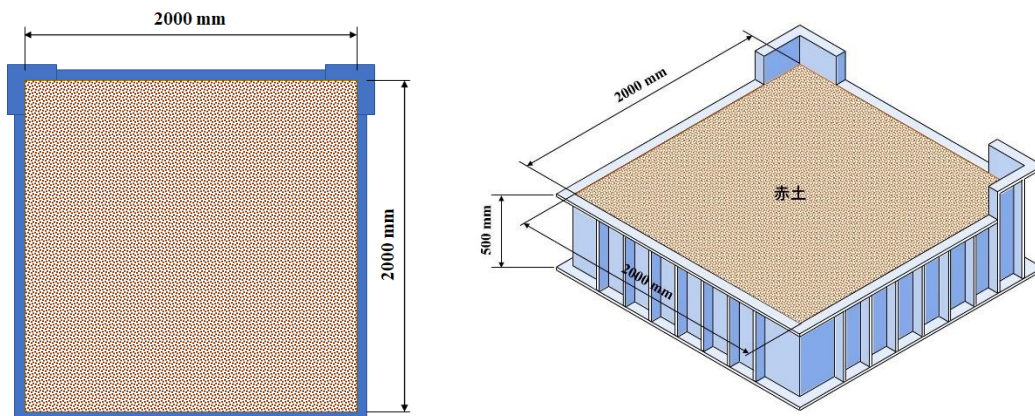


図 3.1.3.2 つくばの埋設物試験場 2（赤土）



図 3.1.3.3 埋設物試験場の写真(2020年10月12日)

#### 3.1.4 まとめ

UAVの飛行実験も想定していたために、本来は比較的広い場所での実験を希望していたが、実際にはつくばの埋設物試験場1のみが、この条件に適合していた。厚木における埋設物試験場でも、飛行実験は試行されたが、 $2 \times 2 \text{ m}^2$ とやや手狭であり、人や機材との距離も十分には離せなかったために、安全のために主な飛行実験はつくばの埋設物試験場1で実施されている。また、つくばの埋設物試験場2では、赤土と関東ローム土の実験が行われたが、実験に使用した関東ローム土は相模原にある陸上装備研究所の管理土槽室から移設したものであり、実験後に返却されている。

## 3.2 市販音源を用いた音波照射による地表面振動の計測

### 3.2.1 珪砂の場合

#### 3.2.1.1 小型砂槽を用いた実験結果 1 (埋設物の大きさと深さ)

##### (実験セットアップ)

大型の埋設物試験場が完成する前に、基礎特性を把握するために小型砂槽(500×500×300 mm<sup>3</sup>)を用いた実験が行われた。砂槽内に埋設された、直径 100 mm および 160 mm の中空円形容器に対して、音波照射加振による非接触音響探査法<sup>1-10)</sup>を用いた基礎実験を実施した。図 3.2.1.1 に実験セットアップ図を示す。実験の再現性を重視して、粒度分布約 0.3～0.05 mm の珪砂 7 号を土壌として用いた。

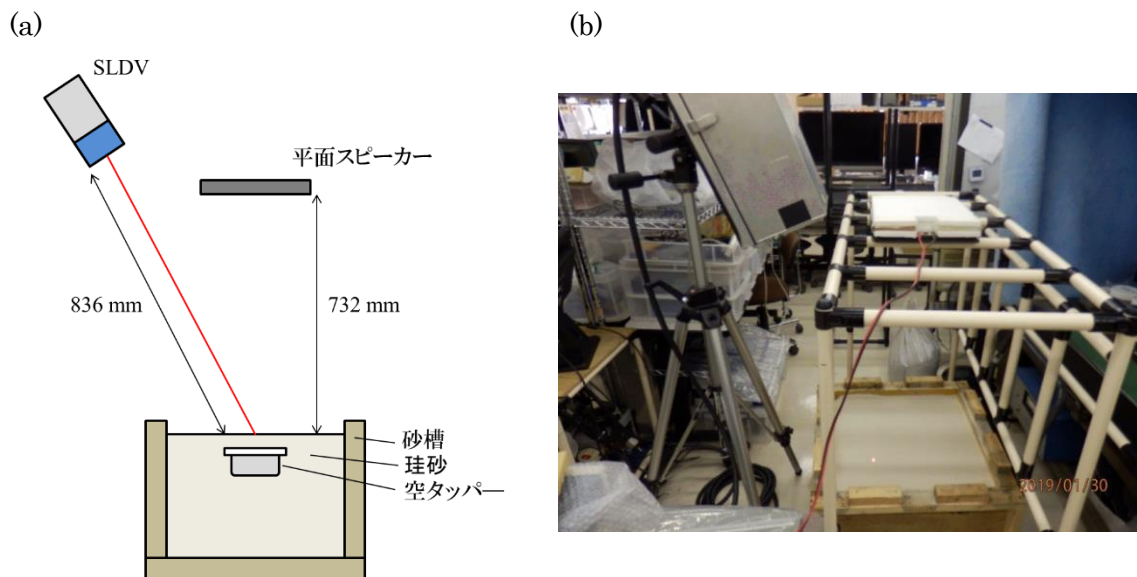


図 3.2.1.1 実験セットアップ (a) 実験セットアップ図、(b) 実験風景

試験用埋設物としては市販の円形容器を使用した(図 3.2.1.2 参照)。直径はそれぞれ 100 mm と 160 mm で重量はそれぞれ 52.8 g と 115.8 g である(蓋部: ポリエチレン、本体部: ステンレス)。埋設時は砂の圧力で蓋が外れないように、蓋の縁から本体の側面まで養生テープを貼った状態で埋設した。

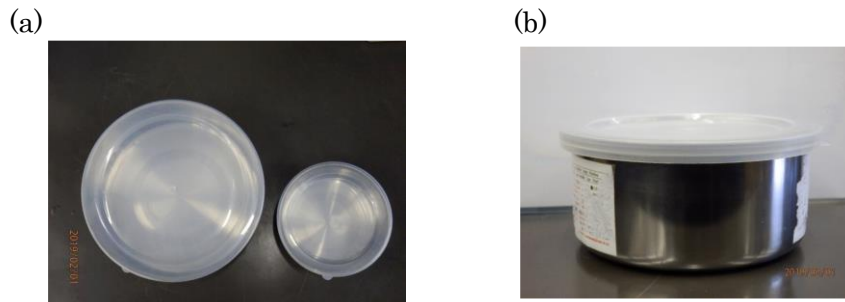


図 3.2.1.2 埋設物 (a) 上面、(b) 側面

実験に用いる砂槽(500×500×300 mm<sup>3</sup>)には約 99 kg の珪砂を入れ、埋設物を設置後、測定前日から約 24 時間砂袋(約 26 kg)の加圧を行った。珪砂上に木板を置き、その上加圧用砂袋を置くことで加圧している。平面音源(FPS 社, FPS2030M3P1R)とスキニング振動計 (SLDV, ポリテックジャパン社, PSV400-H4, He-Ne レーザ)を使用して、音波加振時の珪砂表面の振動速度を測定した。珪砂表面から各装置までの距離はそれぞれ約 732 mm と約 836 mm であった。加振用音波は 2 種類のシングルトーンバースト波<sup>1,6)</sup>を使用した。1つ目のトーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100Hz ~1 kHz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 50 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 950 ms である。2つ目のトーンバースト波のパラメータは周波数範囲 1 kHz ~6 kHz、変調周波数 100 Hz、パルス間インターバル 25 ms、パルス幅 5 ms、波形の長さは 1.275 s である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 95 dB (Z 特性) とした。

### (実験結果)

深さ 50 mm に埋設した直径 100 mm の円形容器に対して周波数範囲 100 Hz~1 kHz の音波を照射した時の埋設物直上と埋設物のない場所の振動の振動速度スペクトルを図 3.2.1.3 に示す。青線は埋設物直上(計測番号 62)、赤線は埋設物のない場所(計測番号 1)の振動の振動速度スペクトルである (計測番号はスキャンエリアの左上が 1 番で右下が 121 番)。図より埋設物上の珪砂が周囲より振動しやすい周波数がある事が確認できる。図 3.2.1.4 にスキャンエリアを示す。測定点数は 121 点(11×11 points)で、測定点間隔は縦横約 22 mm である。白線の丸は埋設物の位置と大きさを示している (この場合は 100mm)。この映像例は砂槽に対してやや斜めに設置した SLDV の CCD カメラの画像のため、埋設物の検出位置が、画面中央よりやや下寄りになっている (振動速度の大きい箇所が想定埋設位置の中心よりやや下に来ている理由については付録 H 参照)。

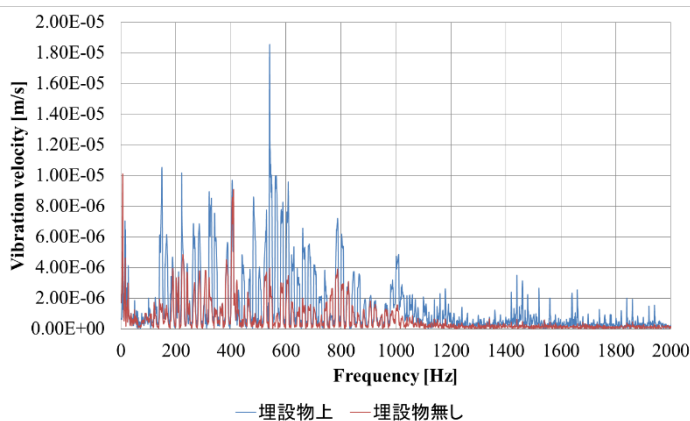


図 3.2.1.3 振動速度スペクトル

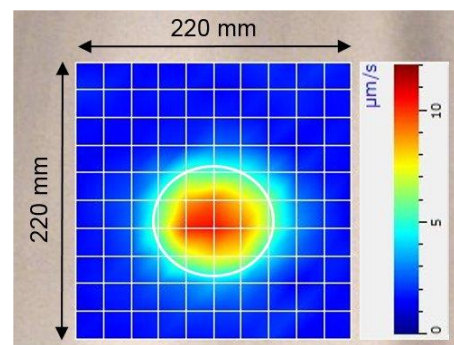


図 3.2.1.4 スキャンエリアと埋設物の位置と大きさ

次に図 3.2.1.3 において、埋設物上が周囲に比べて振動しやすい周波数における振動速度分布を図 3.2.1.5 に示す。

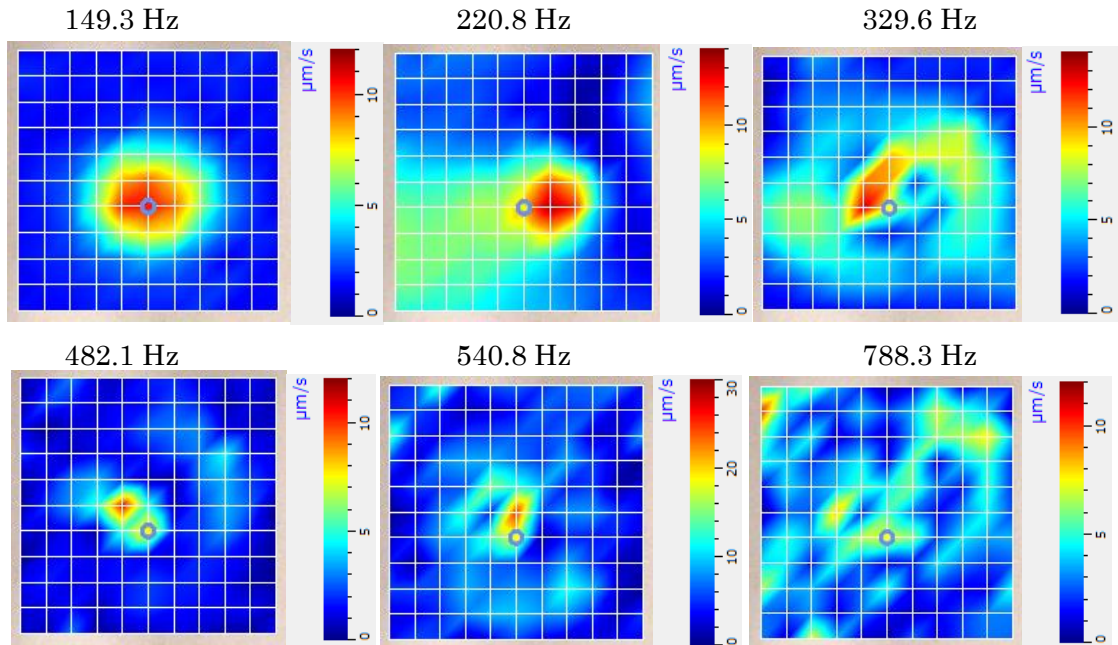


図 3.2.1.5 振動速度分布

図 3.2.1.5 より 300 Hz 以下に埋設物が影響していると思われる振動速度分布が明確に確認されることがわかる。同様にして周波数範囲 1~6 kHz の音波を照射した時の、埋設物上が周囲に比べて振動しやすい周波数における振動速度分布図を図 3.2.1.6 に示す。

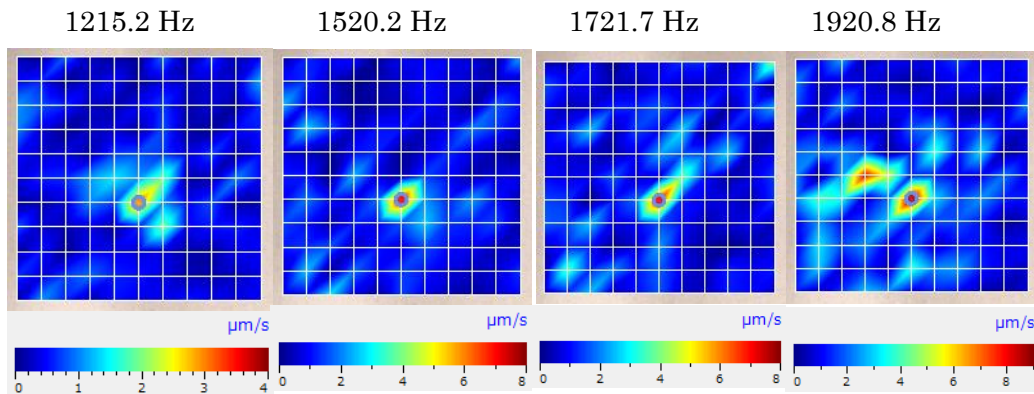


図 3.2.1.6 振動速度分布

図 3.2.1.6 より埋設物の中心付近が局所的に振動しやすい状況であった事が確認できる。ただし、この状況から、埋設物の有無を判定するのは難しいと思われる。

同様な実験を埋設物の深さ、大きさを変化させて行った。振動速度分布として埋設物が周囲に対して明瞭に検出(映像化)される周波数を基本検出周波数とした場合の検出結果例を図 3.2.1.7 に示す。この結果を用いて、埋設物の大きさおよび深さを变化させた場合の基本検出周波数を表 3.2.1.1 および表 3.2.1.2 に示す。



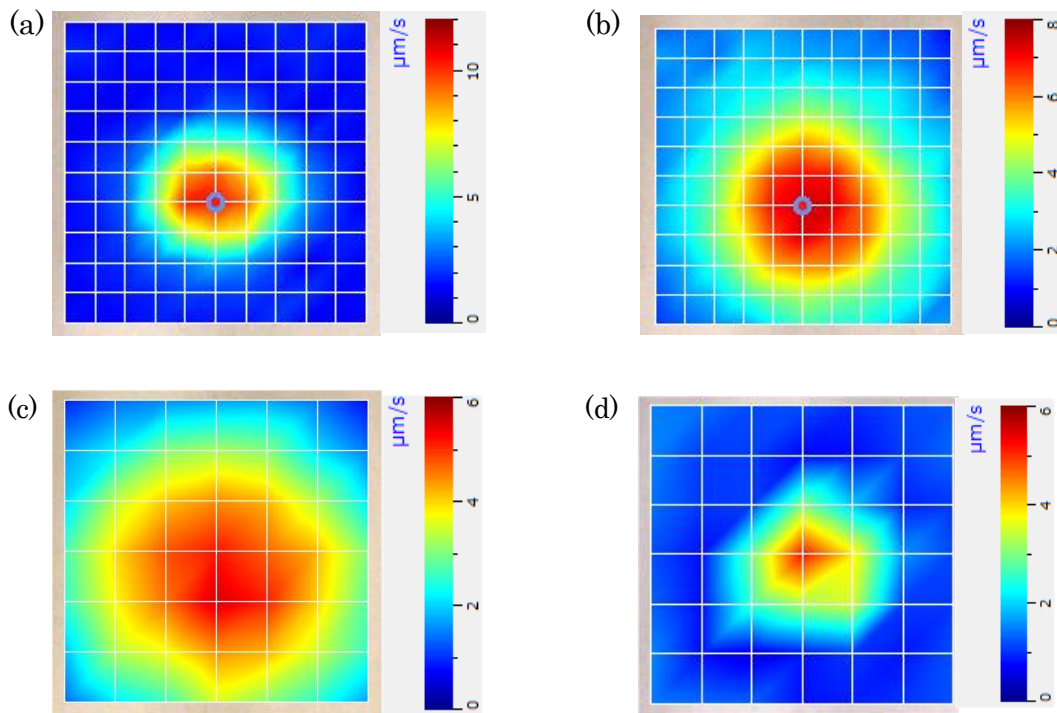


図 3.2.1.7 振動速度分布図 (a) 直径 100 mm, 深さ 50 mm, 基本検出周波数 149.3Hz  
 (b) 直径 100 mm, 深さ 100mm, 基本検出周波数 168.5Hz  
 (c) 直径 100 mm, 深さ 150 mm, 基本検出周波数 166.4Hz  
 (d) 直径 160 mm, 深さ 50 mm, 基本検出周波数 109.9Hz

表 3.2.1.1 直径と検出周波数

埋設物の直径	検出周波数
100 mm $\Phi$	149 Hz
160 mm $\Phi$	110 Hz

表 3.2.1.2 深さと検出周波数

埋設物の深さ	検出周波数
50 mm	149 Hz
100mm	167 Hz
150mm	167 Hz

表より、埋設物の直径は基本検出周波数と反比例するが、たわみ共振現象と異なり埋設物の深さを変化しても、基本検出周波数に大きな変化が見られないことがわかる（たわみ共振の場合には共振周波数は深さに比例する）。

#### (まとめ)

珪砂内に埋設された埋設物に対して音波照射加振を行い、埋設物の深さ、大きさと基本検出周波数（共振周波数）について検討した。その結果、検出される基本周波数は埋設物の大きさに反比例して変化することが明らかになった。一方、埋設物の深さを変えても検出される周波数はあまり変化しなかった。また、埋設位置を深くすると振動する領域が広がって

くことも判明した。これは、捉えられている物理現象がたわみ共振ではなく、埋設状態における容器自体の振動が捉えられているためと考えられる。

### 3.2.1.2 小型砂槽を用いた実験結果 2 (レーザの照射角度)

#### (実験セットアップ)

長距離から土壌表面の振動を測定するため、レーザ照射角度をどのくらいまで浅くできるかの基礎検討を小型砂槽(500×500×300 mm<sup>3</sup>, 珪砂 7 号充填)内に埋設された、直径 100 mm の中空円形容器 (蓋部: ポリエチレン、本体部: ステンレス) に対して、音波照射加振による基礎実験を実施した。図 3.2.1.8 に実験セットアップ図を示す。なお、埋設物を設置した後、測定前日から砂袋で加圧を行った。埋設物の砂表面からの深さは約 50 mm である。

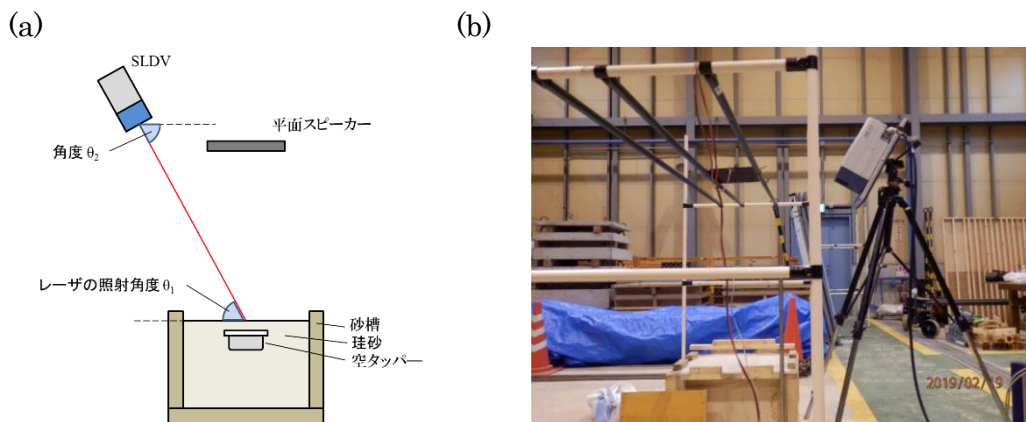


図 3.2.1.8 実験セットアップ (a) 実験セットアップ図、(b) 実験風景

平面音源(FPS INC, FPS2030M3P1R)を砂槽上方の約 1 m に設置し、珪砂表面の振動を測定する SLDV としては赤外線レーザの PSV-500 Xtra (ポリテックジャパン(株))を使用した。その際、防振ケースは使用しない事にした。今回検討したレーザの照射角度を表 3.2.1.3 に示す。レーザの照射角度については垂直入射を 90° としてデジタルアングルメーター(シンワ測定株式会社製)を用いて測定した(砂槽表面の傾斜は小さいと仮定)。

表 3.2.1.3 レーザの照射角度

レーザの照射角度[deg.]	68	60	45	35	30	20
レーザヘッドと測定面との距離[m]	1.004	1.121	1.212	1.082	0.92	0.828

測定に使用した音波はシングルトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100 Hz ~ 300 Hz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 200 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 1 s である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 90 dB とした。

## (実験結果)

図 3.2.1.9 にレーザの照射角度を変更した時の埋設物上の振動速度分布を示す。

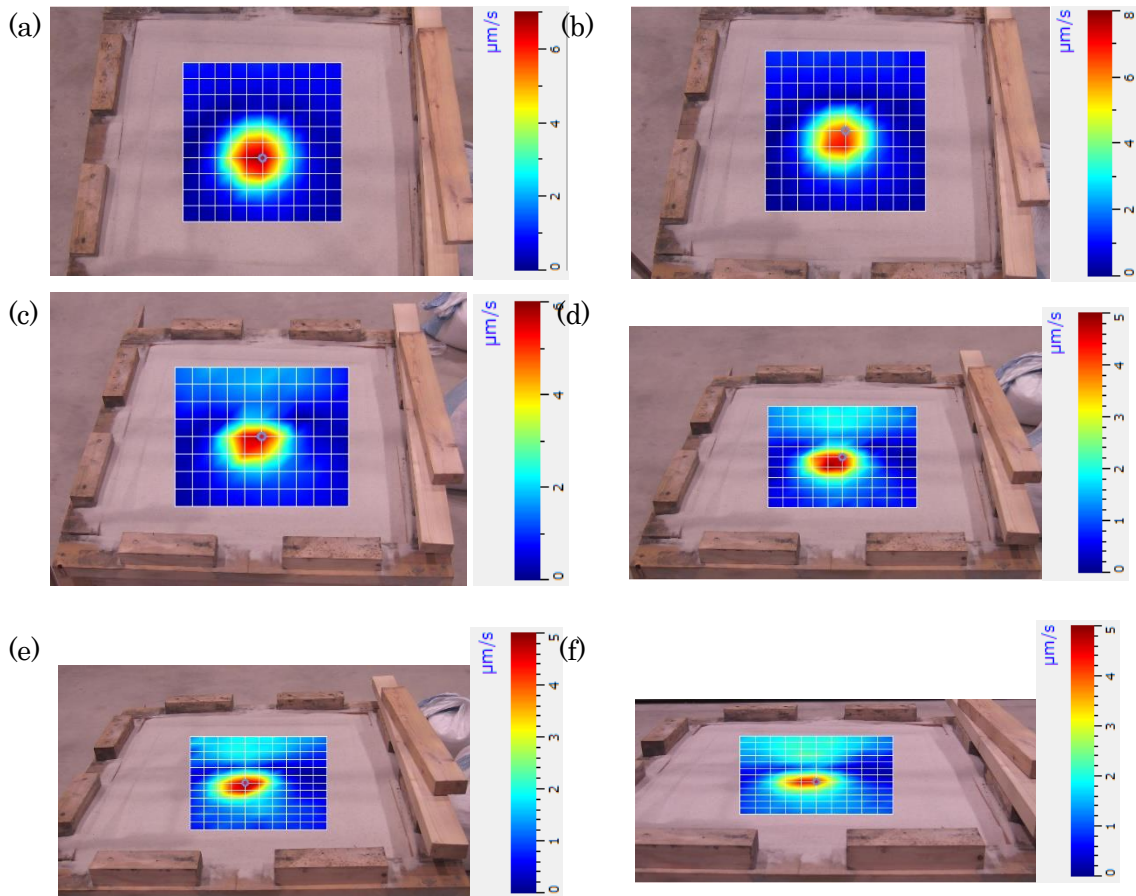


図 3.2.1.9 レーザの照射角度毎の振動速度分布 (映像化周波数:152 Hz、垂直入射:90°)

(a) 68°、(b) 60°、(c) 45°、(d) 35°、(e) 30°、(f) 20°

図 3.2.1.9 より埋設物の影響と思われる周囲より振動速度の値が高くなる傾向は、実験を行った全ての角度において確認できることがわかる。ただし、レーザの照射角度が 60° より小さくなると測定エリア上部に振動速度がわずかに周囲より高くなる傾向が出ている。これは砂槽の大きさの関係で出ている可能性もあるため、大型埋設物試験場で同様の傾向が確認されるか検討する必要があると思われる。

## (まとめ)

測定面に対してレーザの照射角度を変更した実験を行った。実験結果から、測定面とレーザヘッドの距離が約 1 m 程度では、レーザの照射角度を 68° から 20° まで変更しても埋設物を検出出来ることが確認された (垂直入射を 90° とする)。これは、使用した LDV が赤外線レーザであり高感度である事、珪砂がレーザ光を散乱しやすい事、および埋設物の深さが 50 mm と比較的浅い事なども影響していると思われる。

### 3.2.1.3 小型砂槽を用いた実験結果 3 (埋設深さ 50 mm以内)

#### (実験セットアップ)

埋設物を 50 mm 以内の極めて浅い領域に埋設した場合についても検討を行った。埋設物として使用した中空円形容器はフタ付きのホーロー容器 (蓋: ポリエチレン、本体: ホーロー) で、直径は 160 mm と 180 mm で重さはそれぞれ 161 g と 213 g である。ただし、埋設深度が極端に浅い場合に、容器上面の振動で砂を吹き飛ばしてしまわないように、埋設時は容器底面 (ホーロー部) が上方を向くようにした。砂槽 ( $500 \times 500 \times 300 \text{ mm}^3$ , 珪砂 7 号 充填) に、容器底面が露出した状態の埋設深さ 0 mm から約 40 mm までの測定を行った。埋設深さの調整は、砂槽の両サイドの同じ高さに取り付けた板を用いた。この板は砂の表面を平坦にならすためのものである。この板の上に厚さ 3 mm と 10 mm の板を重ね、砂を平坦にする事で埋設深さを調整した。なお、この測定では砂袋による加圧は行っていない。図 3.2.1.10 に実験セットアップを示す。平面音源(FPS 社, FPS2030M3P1R)と SLDV (ポリテックジャパン社, PSV400-H4, He-Ne レーザ) を使用して、音波照射加振時の珪砂表面の振動速度を測定した。珪砂表面から各装置までの距離はそれぞれ 787 mm と 896 mm である。

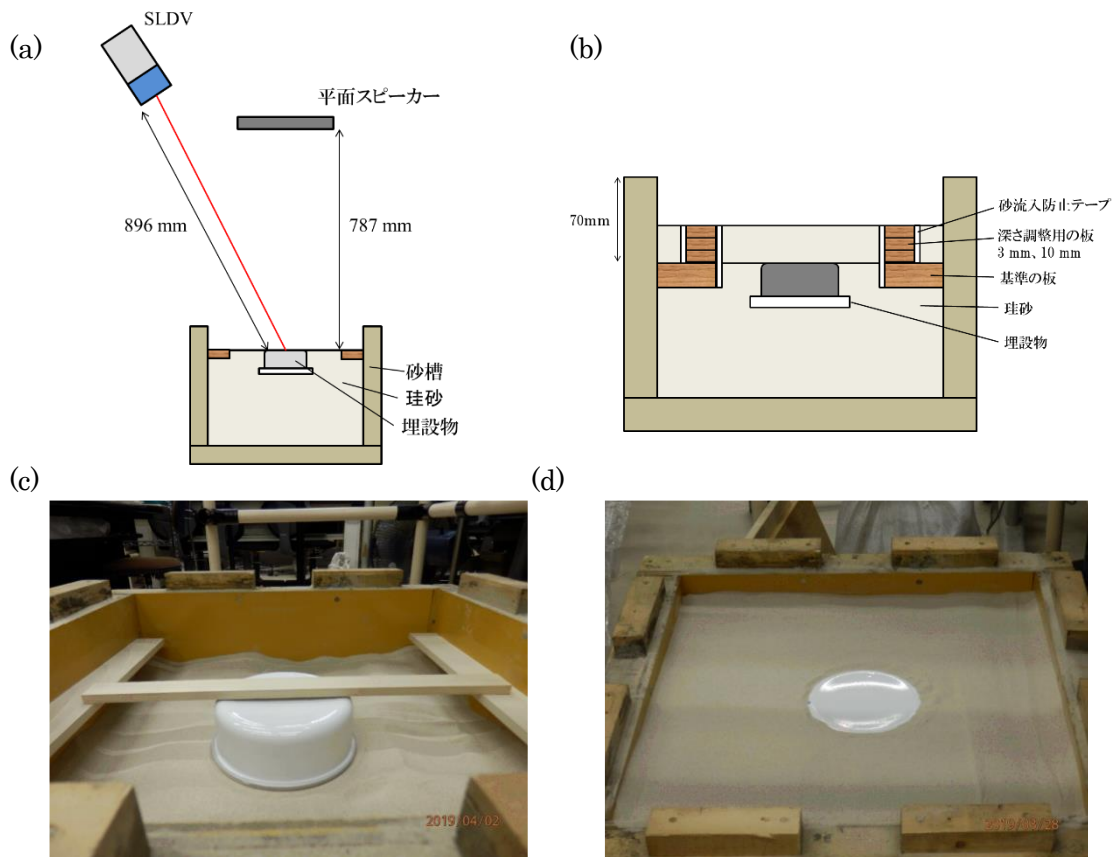


図 3.2.1.10 実験セットアップ

- (a) 実験セットアップ図、(b) 埋設深さ調整の概略図  
(c) 砂槽の両サイドの板の配置、(d) 埋設深さ 0 mm 時の写真

測定に使用した音波としてはシングルトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100 Hz ～1 kHz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 50 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 950 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 95 dB である。図 3.2.1.11 にスキャンエリアを示す。測定点は 81 点(9×9 points)で、測定点間隔は 30 mm である。

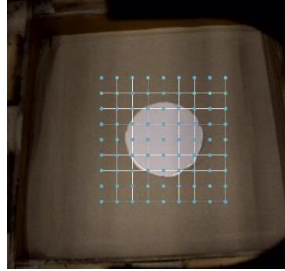


図 3.2.1.11 スキャンエリア (埋設されている容器径: 180mm)

#### (実験結果例)

埋設深さと共振周波数の変化を図 3.2.1.12 に示す。青と赤のマーカ―はそれぞれ埋設物の径が 160 mm と 180 mm の計測結果を示している。図より、どちらも深さ 0 mm～21 mm までは共振周波数の減少傾向がある。21 mm 以降は大きな値の変動は確認出来ない。2 つの測定結果はほぼ同様の傾向を示している事から再現性の高い現象であると思われる。

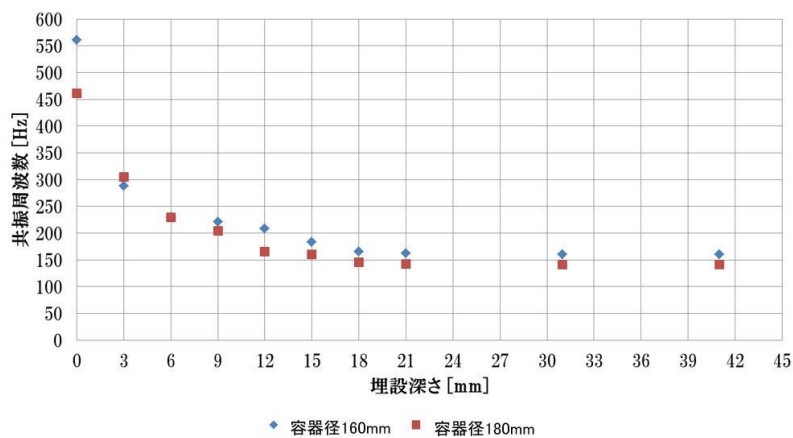


図 3.2.1.12 埋設深さ (0～40mm) と共振周波数の関係

#### (まとめ)

計測対象物を 50 mm 以下に埋設した場合の測定結果について検討を行った。実験結果より、深さ約 20 mm までは共振周波数の減少傾向があり、20 mm 以降ではほぼ一定の周波数となった。この原因は計測対象物の上側に砂粒子が被さり負荷がかかることで、境界条件が変化して比較的自由なたわみ共振から負荷がかかった状態での埋設物自身の共振へと遷移するためと思われる。この実験事実を利用すれば、実際探査を行う際に幅広い周波数の帯域をサーチする必要が無い可能性があり、周波数を調整した加振波形による高速計測が行える可能性も考えられる。

3.2.1.4 埋設物試験場における音波照射加振による基礎実験  
(実験セットアップ)

厚木の佐藤工業(株)技術研究所内に製作していただいた埋設物試験場(2×2×0.5 m<sup>3</sup>、珪砂7号充填)内に円形の埋設物(市販のホーローもしくはステンレス製容器、発泡スチロール及びプラポールベース)を配置した。図 3.2.1.13 に砂槽内の埋設物の設置位置を示す。また、図 3.2.1.14 に埋設前に砂槽表面に各埋設物を置いてみた写真を示す。設置深さは 50 mm、100 mm、200 mm および 300 mm である。

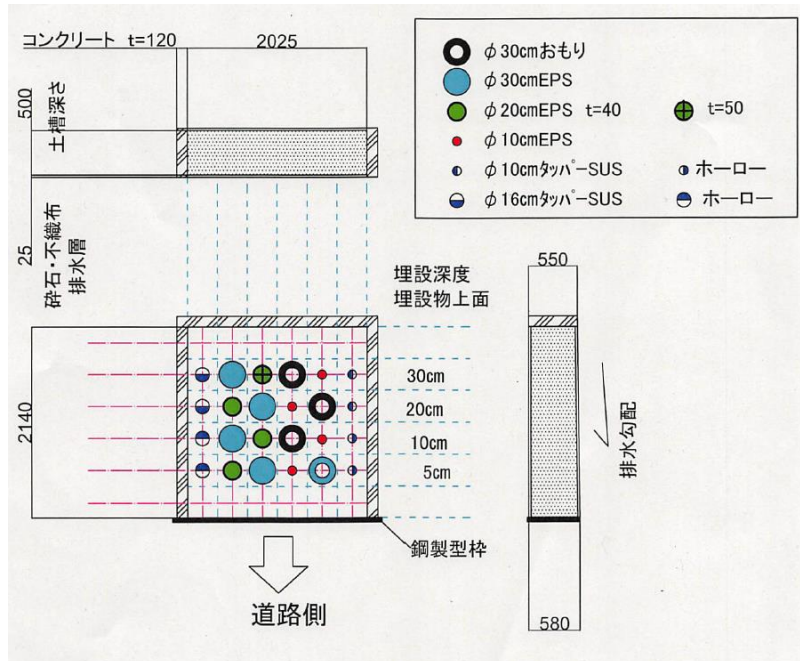


図 3.2.1.13 埋設物の設置位置

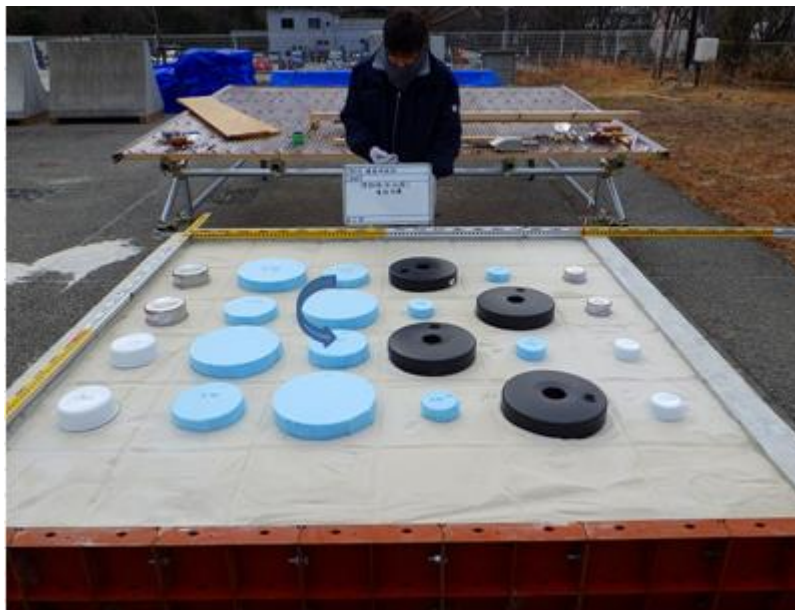


図 3.2.1.14 各埋設物の写真

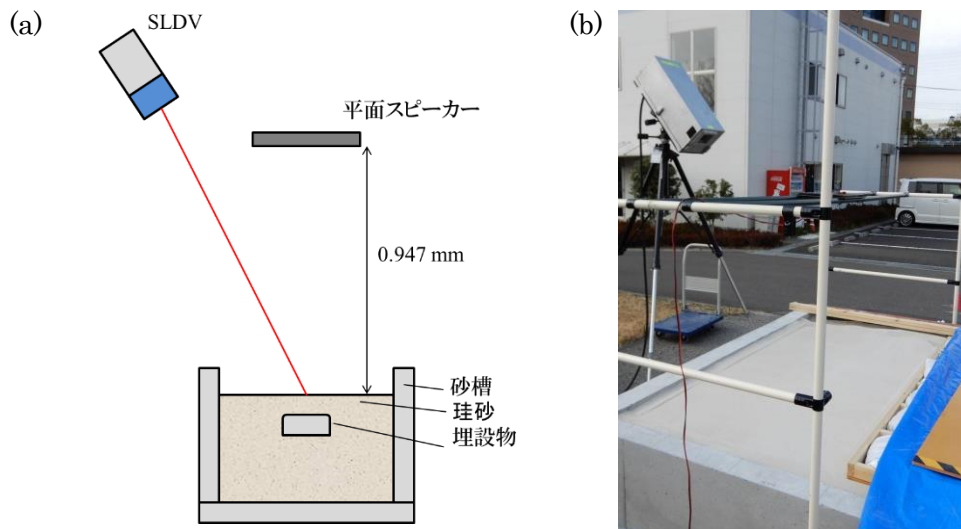


図 3.2.1.15 実験セットアップ

(a) 実験セットアップ図、(b) 実験風景

実験セットアップを図 3.2.1.15 に示す。平面音源(FPS INC, FPS2030M3P1R)を砂槽上方の 0.947 m に設置し、珪砂表面の振動を測定するための SLDV (ポリテックジャパン(株), PSV400-H4)は音源のやや斜め上に設置した。音波照射加振用の音波としてはシングルトーンパースト波を使用した。トーンパースト波のパラメータは周波数範囲 100 Hz ~1 kHz、変調周波数 50 Hz、パルス間インターバル 50 ms、パルス幅 10 ms、波形の長さは 950 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 104 dB とし、測定時の加算平均回数は 5 回とした。ここでは、直径約 300mm のプラボールベースを対象とした場合の計測結果例を以下に示す。

#### (実験結果例 1 …埋設深度 50 mm)

図 3.2.1.16 に測定領域 (スキャンエリア) を示す。測定点数は 99 点(9×11 points)で、測定点間隔は約 50 mm である。なお、この時の砂表面から SLDV までの距離は 1.557 m であった。

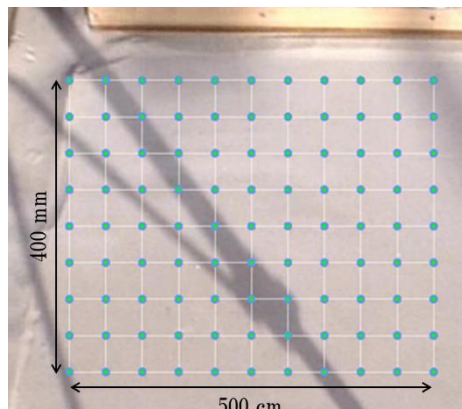


図 3.2.1.16 スキャンエリア

図 3.2.1.17 に埋設物上と思われる位置における振動速度スペクトルを示す。

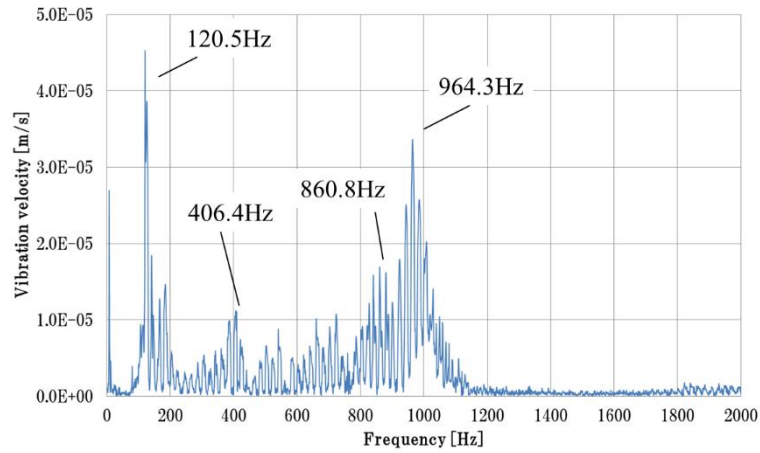


図 3.2.1.17 振動速度スペクトル (index 60)

図 3.2.1.18 に測定領域 (スキャンエリア) を示す。測定点数は 99 点(9×11 points)で、測定点間隔は約 50 mm である。なお、この時の砂表面から SLDV までの距離は 1.557 m であった。

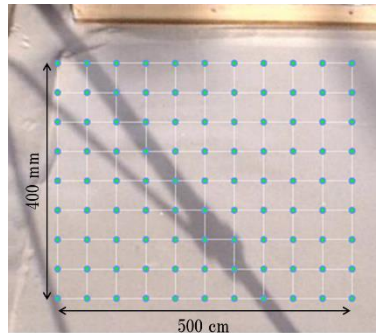


図 3.2.1.18 スキャンエリア

図 3.2.1.19 に埋設物上と思われる位置における振動速度スペクトルを示す。

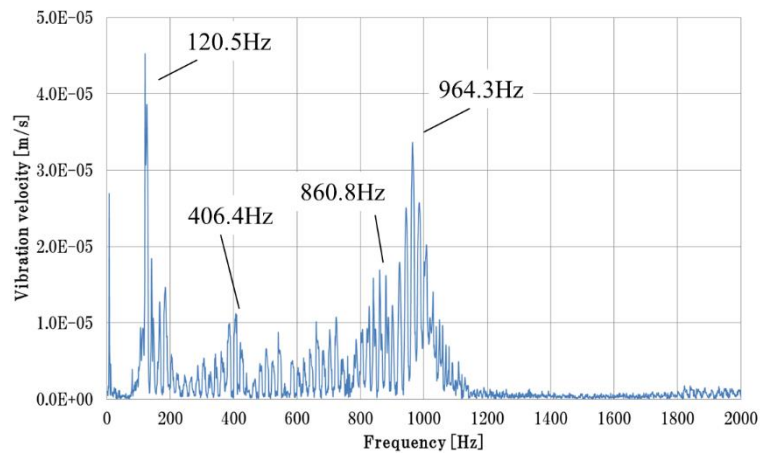


図 3.2.1.19 振動速度スペクトル (index 60)



図 3.2.1.19 より埋設物上では上記のように複数周波数の振動が発生していることがわかる。図中に示した各周波数の振動速度分布を図 3.2.1.20 に示す。

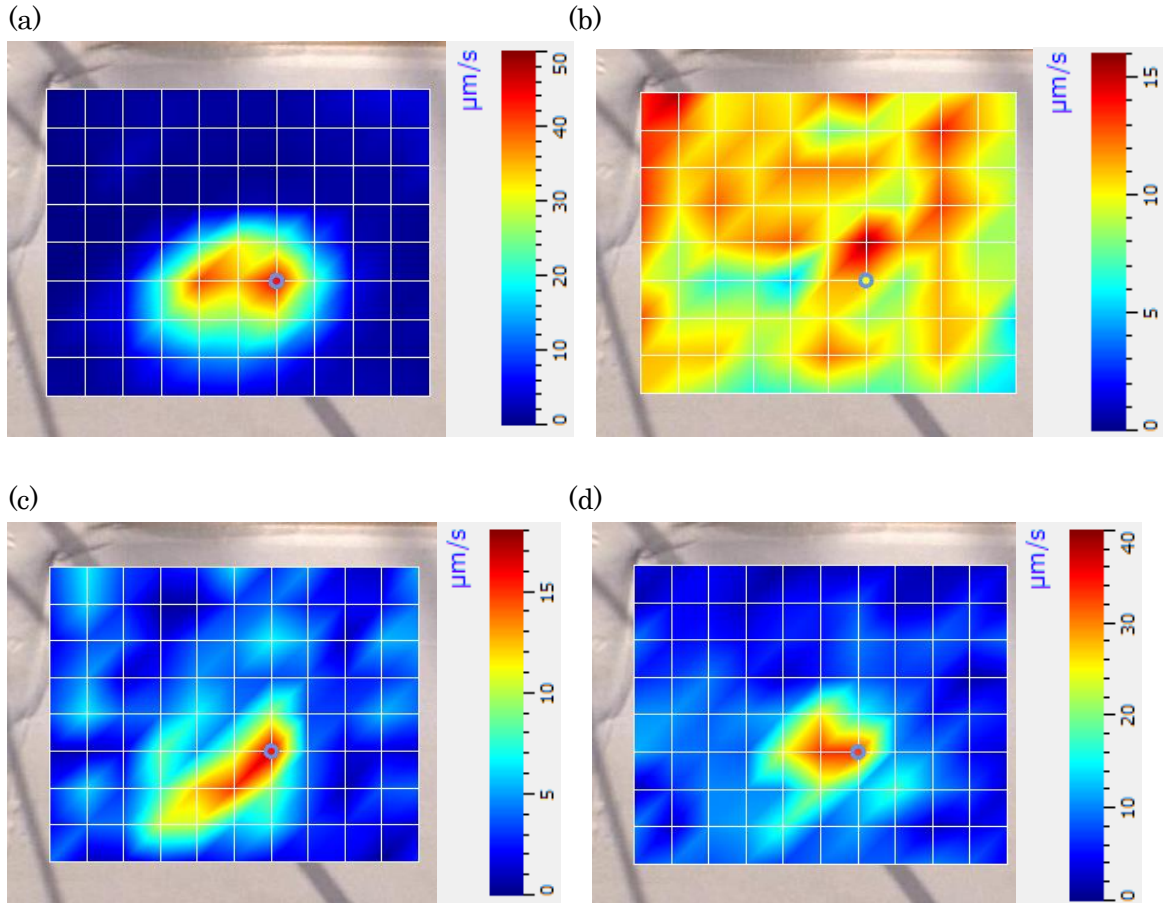


図 3.2.1.20 振動速度分布

(a)120.5 Hz、(b)406.4 Hz、(c)860.8 Hz、(d)964.3 Hz

図 3.2.1.20 より、120.5 Hz において埋設物の形状に近い振動速度分布が確認できる。406.4 Hz は使用したレーザドップラ振動計自体の共振であると思われる。860.8 Hz と 964.3 Hz は 120.5 Hz 程ではないが、周囲に比べて埋設物上が振動しやすい状況にある事がわかる。

**(実験結果例 2…埋設深度 100 mm)**

図 3.2.1.21 に測定領域（スキャンエリア）を示す。測定点数は 117 点(9×13 points)で、測定点間隔は約 45 mm である。この時の砂表面から SLDV までの距離は 1.732 m である。

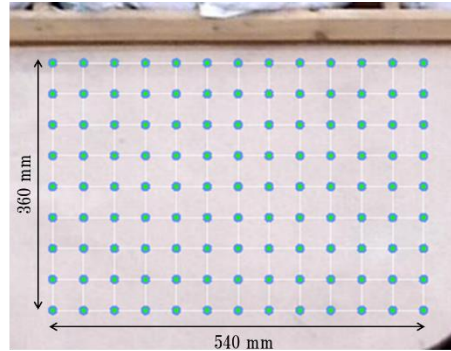


図 3.2.1.21 スキャンエリア

図 3.2.1.22 に埋設物上と思われる位置における振動速度スペクトルを示す。

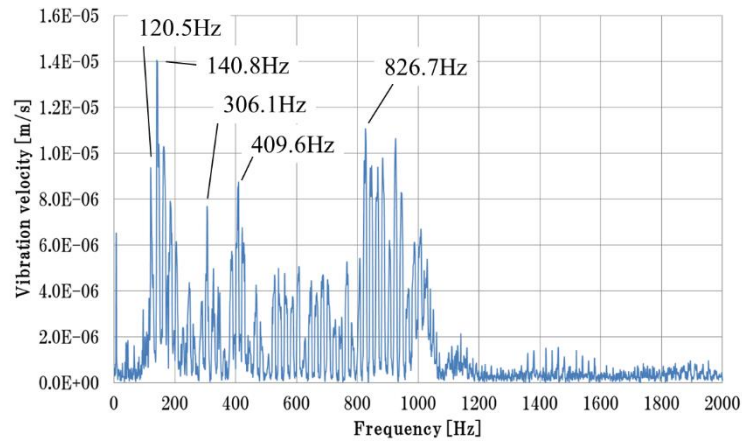


図 3.2.1.22 振動速度スペクトル (index 58)

図 3.2.1.22 より埋設物上では上記のように複数周波数の振動が発生していることがわかる。図中に示した各周波数の振動速度分布を図 3.2.1.23 に示す。

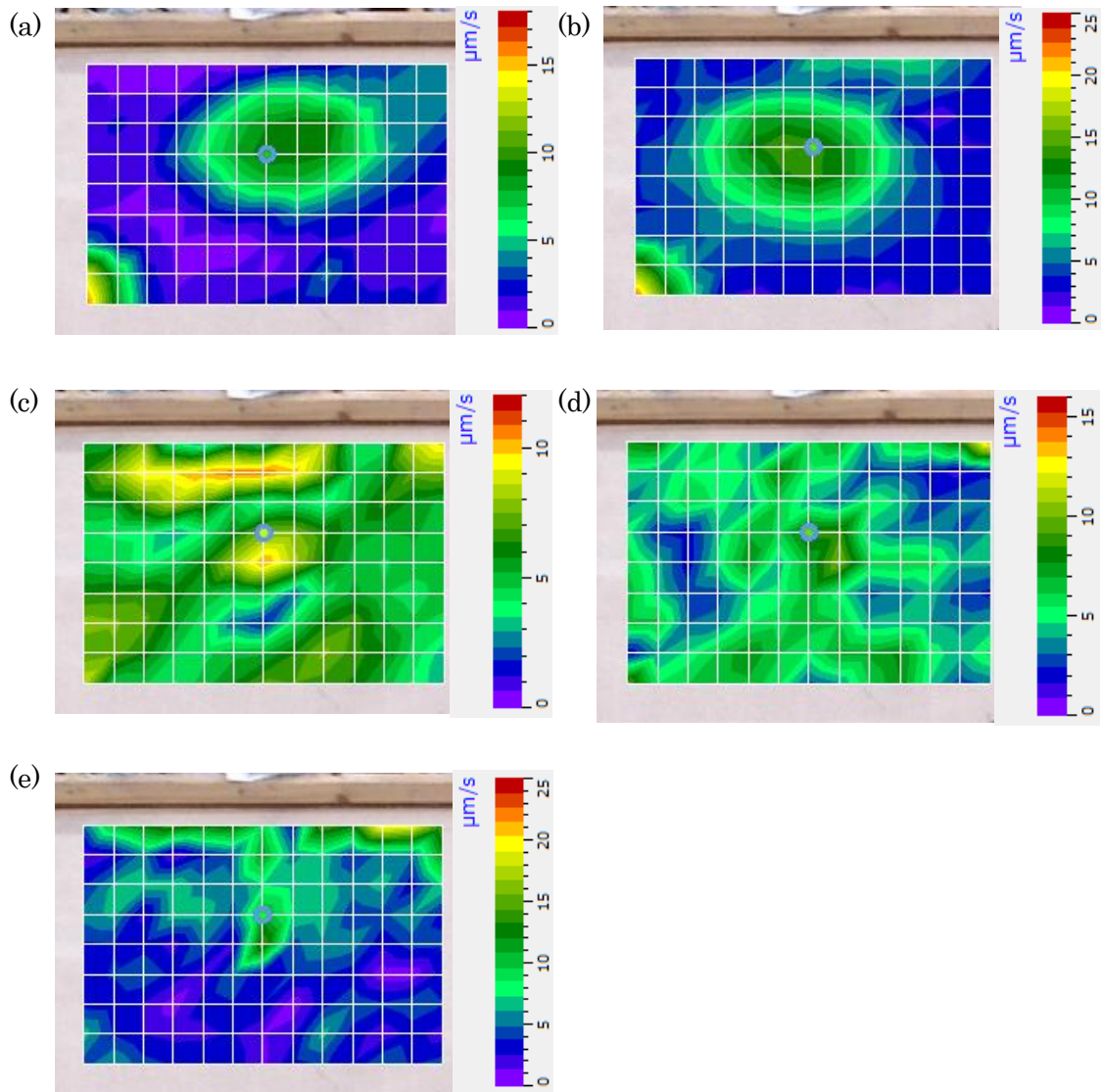


図 3.2.1.23 振動速度分布

(a)120.5 Hz、(b)140.8 Hz、(c)306.1 Hz、(d)409.6 Hz、(e)826.7 Hz

図 3.2.1.23 より、120.5 Hz と 140.8 Hz において埋設物形状に近い振動速度分布が確認できる。(a)(b)の左下に出ている反応は、隣接する埋設深度 5 cm の埋設物（プラポールベース）の振動である。306.1 Hz と 409.6 Hz と 826.7 Hz は上方に置かれている加圧用の板の振動と思われる影響があり、埋設物の振動と断定できない。上記の結果から埋設深度 50 mm と 100 mm では共振周波数に大きな変化が出ないことが確認できた。

(まとめ)

厚木の埋設物試験場（珪砂充填）にて、深度 50 mm および 100 mm の位置に埋設された直径約 300 mm のプラポールベースの検出を試みた。実験結果から深さを変えても基本検出周波数はほとんど変化しないということが明らかになった。

### 3.2.2 ローム土の場合

#### 3.2.2.1 陸上装備研究所 管理土槽室における基礎実験

##### (実験セットアップ)

2020年7月および8月に、相模原市にある陸上装備研究所内の管理土槽室において非接触音響探査法を用いた埋設物探査実験を実施した。天井のある屋内での実験であったために、UAVは使用せず、固定台の上に乗せた音源とLDVを用いて、近距離計測(1 m, 3 m)および遠距離計測(10 m, 20 m, 30 m)を行った。図 3.2.2.1、図 3.2.2.2 にそれぞれ近距離計測、および遠距離計測の実験セットアップ図を示す。加振用音源であるフラットスピーカ(FPS2030M3P1R, FPS INC.)はイレクターパイプ(Yazaki Kako Corp.)およびメタルジョイント(Yazaki Kako Corp.)により組まれた台の上に配置し計測対象面に対して音響放射を行い、スキャニングレーザドップラ振動計であるPSV-500 Xtra (Polytec Japan Corp.)は計測距離に合わせて位置を調整しながら、計測対象面の振動計測を行った。なお、音波による加振力を調整変化させるために、図 3.2.2.1(a),(b)および図 3.2.2.2(a),(b)に示すように適宜音源の高さを変更して実験している(約 1.2m～約 0.8m 程度)。

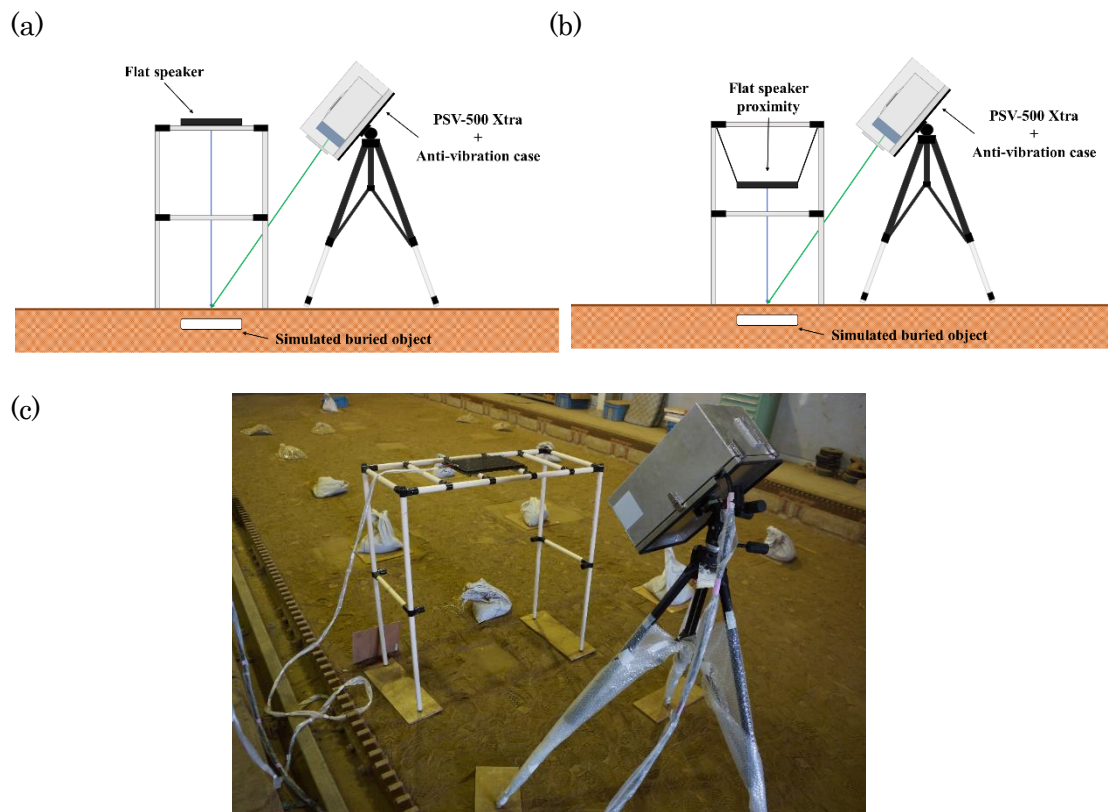


図 3.2.2.1 近距離用実験セットアップ (a) 実験セットアップ図(音源高さ約 1.2m 時)、  
(b) 実験セットアップ図(音源高さ約 0.8m 時)、(c) 実験風景

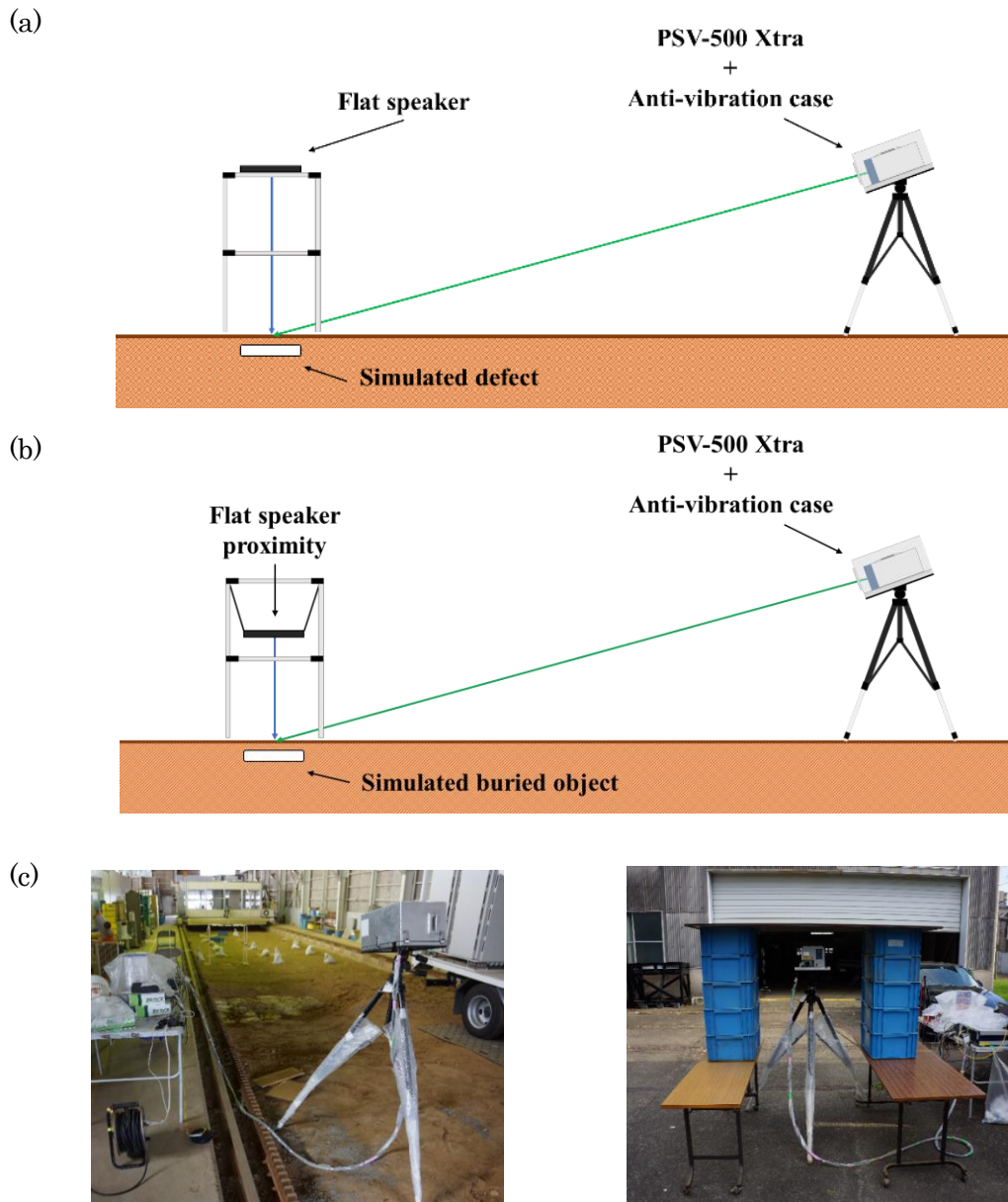


図 3.2.2.2 遠距離用実験セットアップ (a) 実験セットアップ図(音源高さ約 1.2m 時)、  
(b) 実験セットアップ図(音源高さ約 0.8m 時)、(c) 実験風景

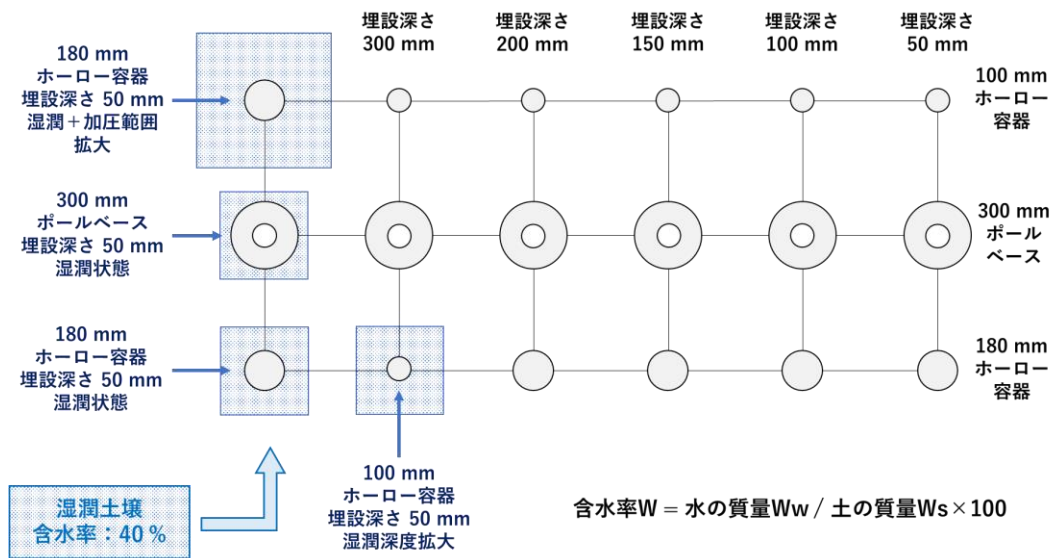
#### (模擬埋設物について)

模擬埋設物としては、直径 300 mm のポールベース (PE 製、中央部に直径約 60mm の穴が開いたドーナツ形状、高さ約 60mm) および直径 180 mm (高さ約 60mm) と直径 100 mm (高さ約 40 mm) のホーロー容器 (ホーロー鋼板製+ポリエチレンの蓋付) の 3 種類を準備した。すべて中空の状態で使用した。なお、ホーロー容器の場合は、蓋の部分を下になるようにし、かつ蓋部が外れてしまわないように養生テープで容器本体に固定した。

(模擬埋設物の設置状況)

今回の非接触音響探査法実験における計測対象である模擬埋設物の埋設位置を図 3.2.2.3 に示す。図 3.2.2.3(b)は、図 3.2.2.3(a)の右側から撮影したものである。模擬埋設物の埋設深度は 50、100、150、200、300 mm の 5 パターン存在しているが、今回の実験では時間の関係上埋設深度 50 mm および 100 mm の模擬埋設物を対象に計測を実施している。また、今回は佐藤工業による土の締固め試験結果より含水率を約 40%に高めた土壤に模擬埋設物が埋設されていた場合における、計測結果への影響も同様に検証した(他は約 18~20%程度の含水率で、かなり乾燥している状態)。さらに、含水率を高めた土壤の範囲を変化させた影響についても検証を行った。

(a)



(b)

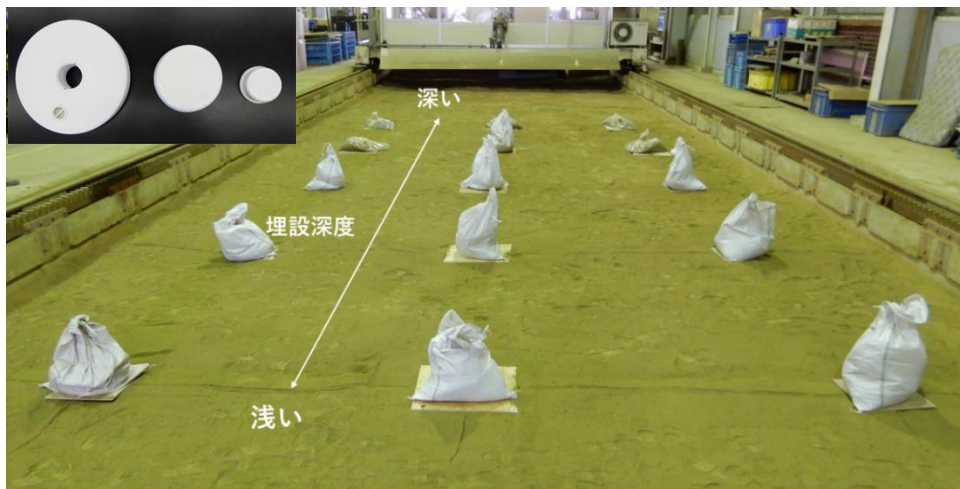


図 3.2.2.3 模擬埋設物設置状況 (a) 8月実験時の埋設物配置、(b) 初期設置時写真

模擬埋設物の埋設状態図を図 3.2.2.4 に示す。前述したように今回は土壌中の含水率(通常時 20%)および湿潤範囲を変えて模擬埋設物を埋設した。埋設方法は、模擬埋設物の上面が指定した埋設深度になるように穴を掘り、模擬埋設物を配置した後に土を被せ、土壌表面に木板を置き加圧を行っている。加圧に使用した木板は約 300~450 mm 角程度の大きさで(直径 100 mm の埋設物には小さな板を、それより大きな埋設物にはなるべく大きな板を使用)、木板の上に約 5 kg 程度の重さに調整した土嚢袋を置くことにより加圧を行った。また、含水率が異なるものは、模擬埋設物の上から被せる土を含水率が 40%程度になるように調整された土に変更することで、土壌中の水分量を変化させている。土壌中の水分量を変化させた場合の計測対象の写真を図 3.2.2.5 に示す。含水率を変化させた理由は、陸装研のローム土の場合、含水率 20%程度しかなく、表面がさらさらの砂のような状態になっており、音波照射により表面粒子が簡単に振動してしまうことが判明したためである。そのため、最適な締固め状態になるように、佐藤工業側にこのローム土の締固め特性を調べてもらった。その結果として、実験現場で調整しやすい値として 40%程度の含水率に調整することとしたのである(このローム土の締固め特性図については付録 A 参照)。

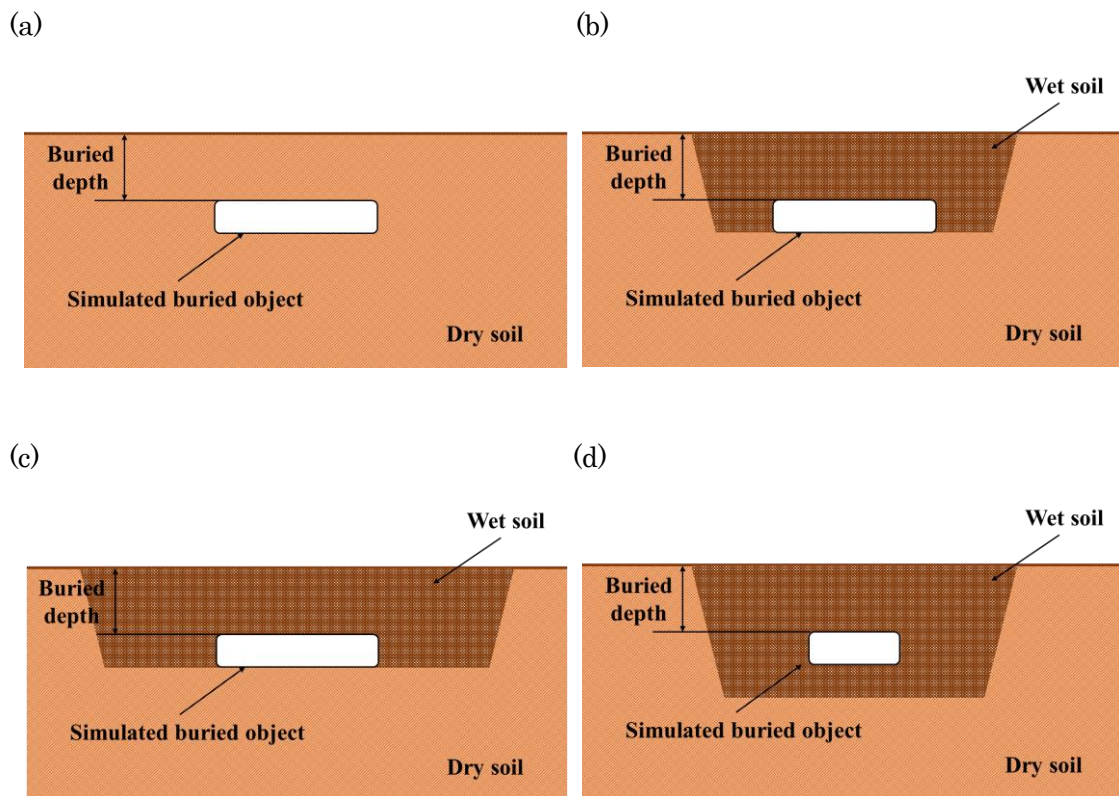


図 3.2.2.4 模擬埋設物の埋設状態図

(a)通常時：含水率約 20% (b)湿潤状態：含水率約 40%

(c) 湿潤+加圧範囲拡大：含水率約 40% (d) 湿潤深度拡大：含水率約 40%



図 3.2.2.5 湿潤土壌(含水率約 40%)の計測対象例

**(実験結果・・・計測対象別の近距離計測 比較結果)**

計測対象別の近距離計測比較結果を図 3.2.2.6 に示す。埋設物は直径 300 mm のプラポールベース、直径 180 mm ホーロー容器および直径 100 mm のホーロー容器である。LDV による計測距離は約 1 m で埋設深さは約 50 mm である（土壌の含水率 20%、映像化周波数範囲 50-200 Hz）。図より、乾燥した土壌でも、直径 180 mm 以上の埋設物が明確に検出できることが分かる。プラポールベースは中央穴部の振動の違いも見取ることができる。また、使用した波形は周波数範囲 50-200 Hz のマルチトーンバースト波である。なお、図の右側には実験条件（覚書）、実験日、実験番号、加水有無、音源と地表面までの距離、SLDV と地表面までの距離が参考のために記載されている。



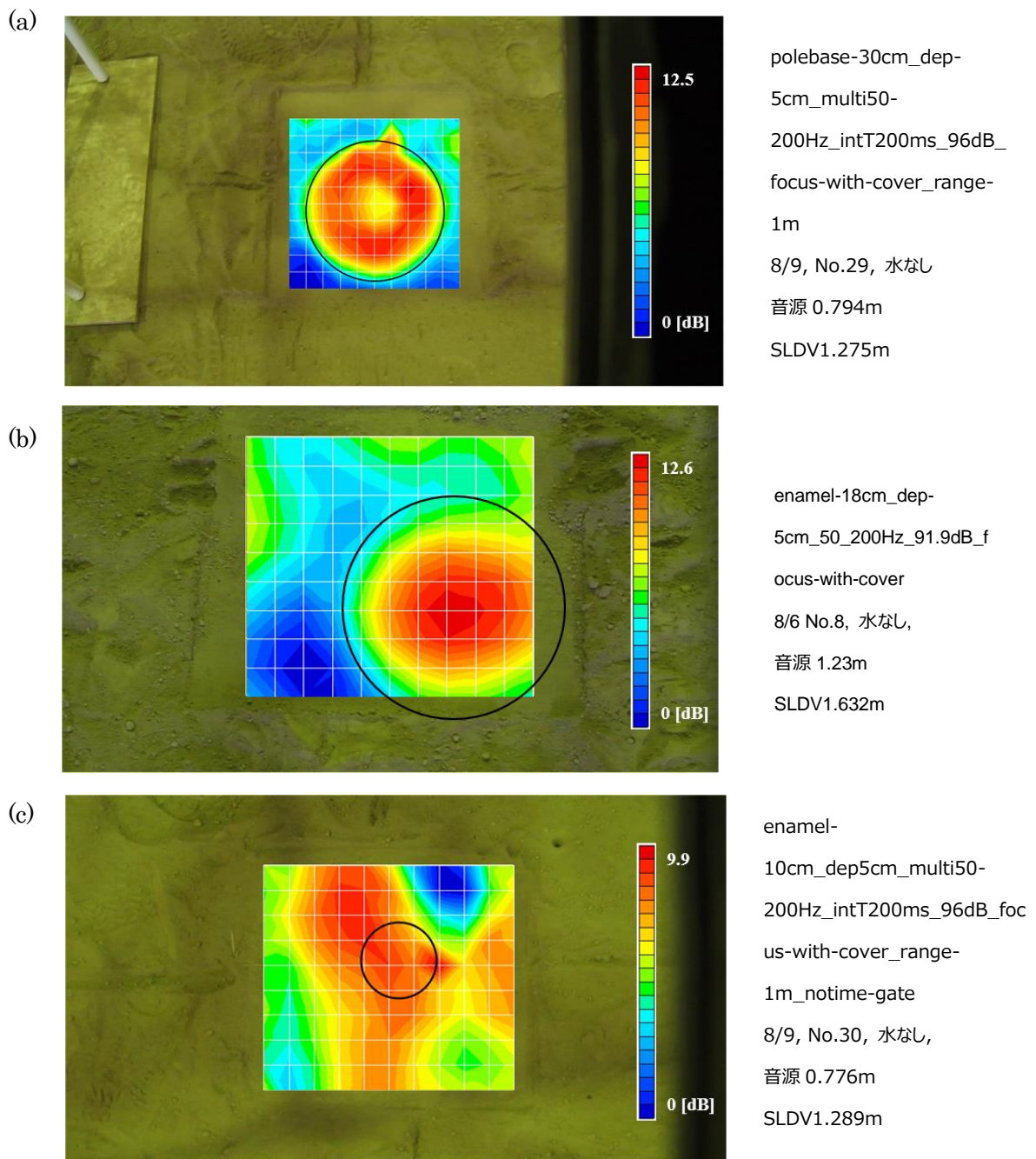


図 3.2.2.6 振動エネルギー比による映像化例 (a) 300 mm プラポールベース, (b)180 mm ホーロー容器, (c) 100 mm ホーロー容器、黒円は埋設物の位置と大きさを示す。埋設深さは 50 mm。

## (実験結果・・・埋設深さ別比較結果)

深さ 50 mm では検出可能であった直径 300 mm のプラポールベースの場合の埋設深さ 100 mm の場合の結果例を図 3.2.2.7 に示す (計測距離は 1 m)。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のマルチトーンバースト波を使用した。

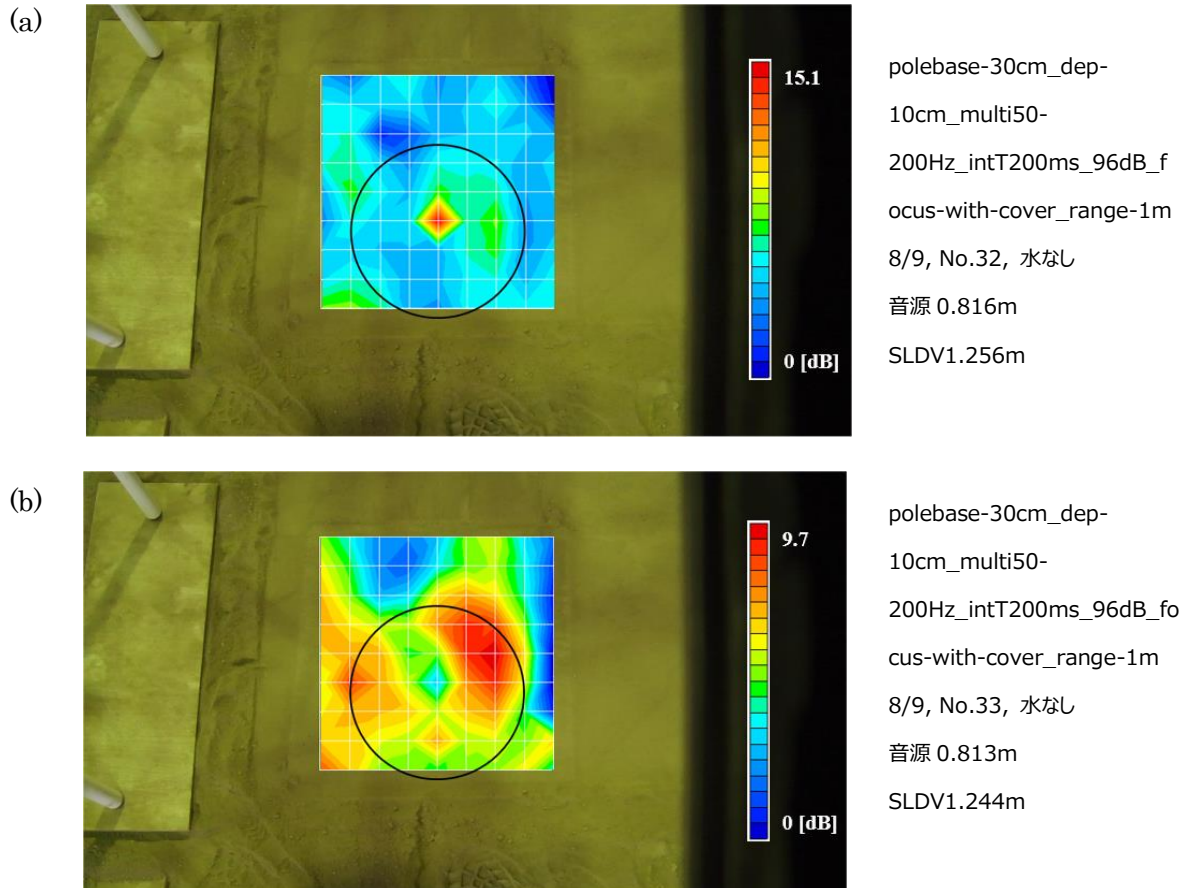


図 3.2.2.7 300 mm プラポールベースの振動エネルギー比による映像化例

(a) 深さ 100 mm、映像化周波数範囲 50-200 Hz、

(b) 深さ 100 mm、映像化周波数範囲 50-120 Hz、

黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

図より、乾燥した土壌 (ローム土) では、100 mm の深さになると、土壌表面自体に加振エネルギーが吸収されてしまうために埋設物自体の検出が難しくなることがわかる。ただし、図 3.2.2.7(b)に示すように対象物の揺れやすい周波数近辺 (ここでは 50~120 Hz) のみを映像化周波数とすることにより、埋設物自体の振動を捉えることができることがわかる。

同じく深さ 50 mm では検出可能であった直径 180 mm のホーロー容器の場合の埋設深さ別の比較結果を図 3.2.2.8 に示す。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のマルチトーンバースト波を使用した。

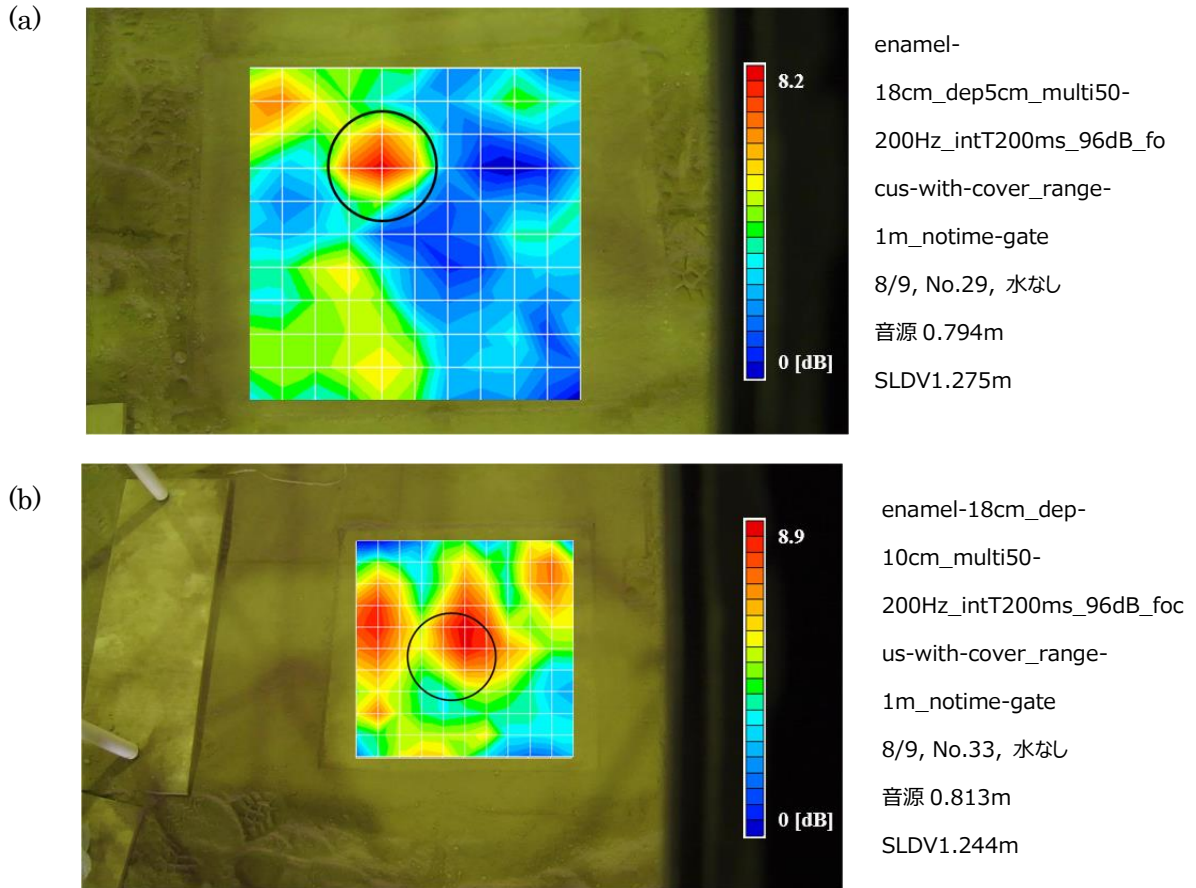


図 3.2.2.8 直径 180 mm のホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例

- (a) 深さ 50 mm、映像化周波数範囲 50-200 Hz、  
(b) 深さ 100 mm、映像化周波数範囲 50-200 Hz、  
黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

直径 180 mm のホーロー容器の場合、埋設深さ 50 mm であれば検出可能であるが、埋設深さ 100 mm になると、埋設物の真上であっても、周囲の土壌表面振動と同じ程度の振動となるため、検出が困難になることがわかる。

#### (実験結果・・・加水有無の比較\_直径 300 mm ポールベース)

図 3.2.2.9 に埋設深さ 50 mm の直径 300 mm ポールベースの場合の、加水有無による比較を示す。図より、埋設物上の土の状態に依存して検出される振動分布が変化するものの、検出可能であることが確認できる。また含水率 40%の場合には、見た目はあまり変化しないが、周波数範囲を絞ることで、振動エネルギー比にも若干向上がみて取れる。なお、使用波

形は周波数範囲 50-200 Hz および 50-300 Hz のマルチトーンバースト波である。

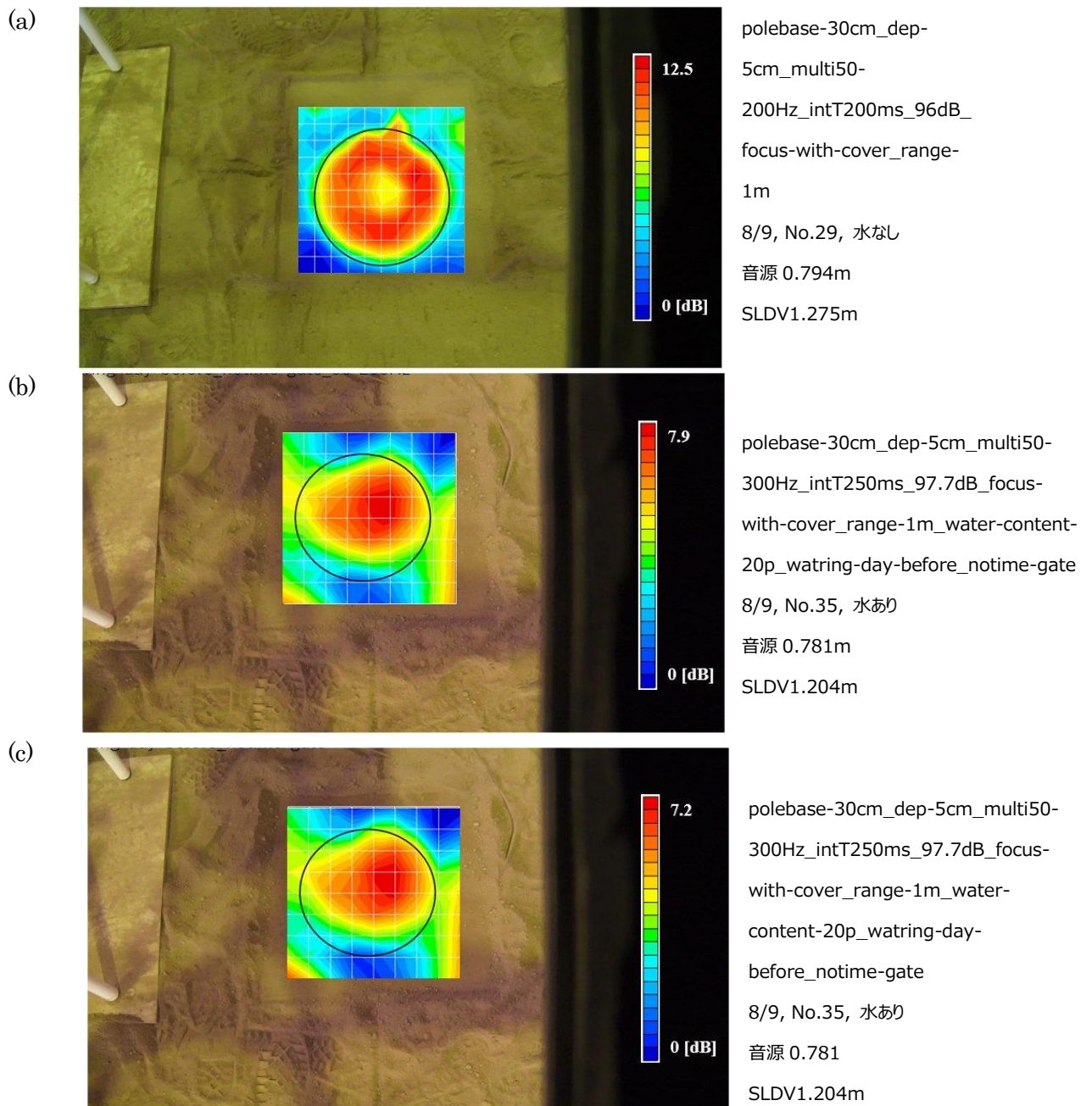


図 3.2.2.9 加水有無の比較、300 mm ボールベースの場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 含水率 20% 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(b) 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(c) 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-300Hz、黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

(実験結果・・・加水有無の比較\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.10 に埋設深さ 50 mm 直径 180 mm ホーロー容器の場合の、加水有無による比較を示す。図より、直径 180 mm ホーロー容器の場合には、含水率 40%に上げることで、地表面にある細かい土粒子の振動が抑えられて、明確な検出ができることがわかる。図 3.2.2.10(b)では 1 点だけ強い振動エネルギー比を示す箇所があるが、これは地表面下にある小石が反応したことが考えられる。(c)はその点を除いた結果である。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 および 50-300Hz のマルチトーンバースト波である。

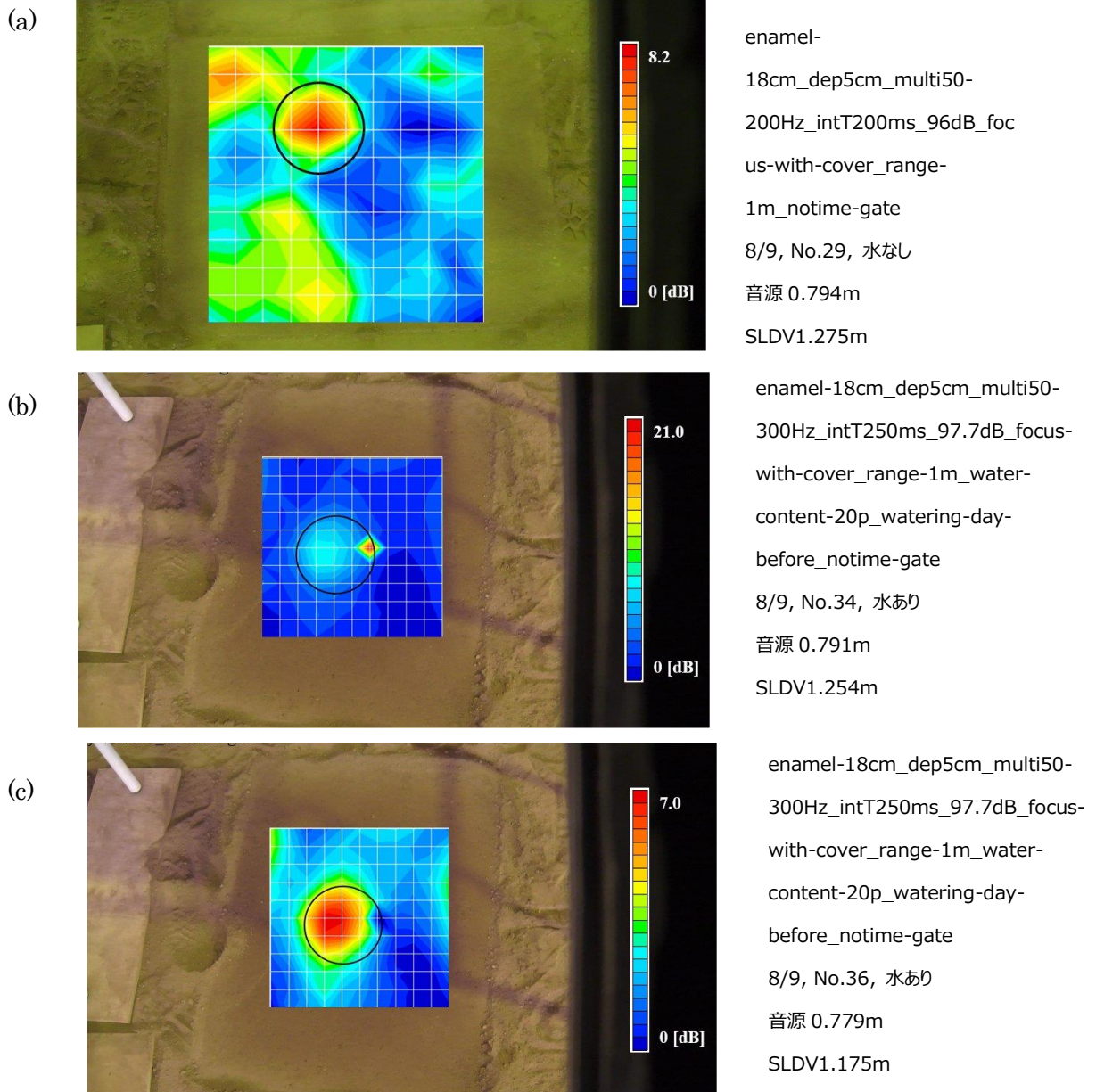


図 3.2.2.10 加水有無の比較、180 mm ホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例、(a) 含水率 20% 周波数範囲 50-200Hz, (b) 含水率 40% 周波数範囲 50-300Hz, (c) 含水率 40% 周波数範囲 50-200Hz, 黒円は埋設位置と大きさを示す。

## (実験結果・・・加水有無の比較\_直径 100 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.11 に埋設深さ 50 mm の直径 100 mm ホーロー容器の場合の、加水有無による比較を示す。図より、直径 100 mm ホーロー容器の場合にも、含水率 40%に上げることで、地表面にある細かい土粒子の振動が抑えられて、明確な検出ができることがわかる。なお、この容器の場合には、容器の大きさが小さかったこともあり、容器の下部も含めて包み込むような形で含水率の高い箇所を作成した上で実験している。(c)は、計測結果におけるノイズを削除するために、周波数範囲を絞って映像化を行った。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz および 50-300 Hz のマルチトーンバースト波である。

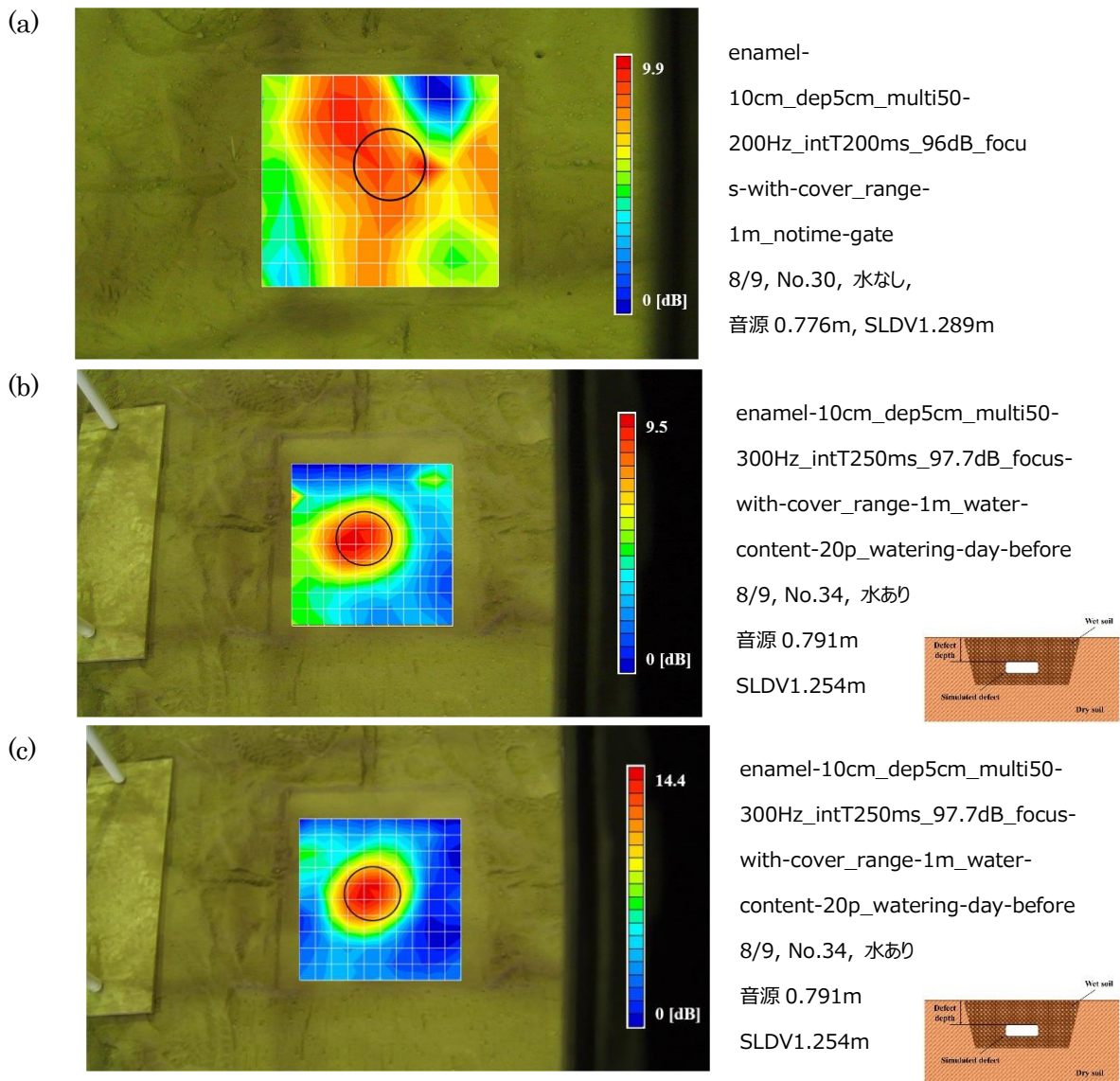


図 3.2.2.11 加水有無の比較、100 mm ホーロー容器の場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 含水率 20% 映像化周波数範囲 50-200 Hz、(b) 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-300 Hz、(c) 含水率 40% 映像化周波数範囲 220-350 Hz、黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

(実験結果・・・加水日時の比較\_直径 300 mm プラポールベース)

図 3.2.2.12 に埋設深さ 50 mm の直径 300 mm プラポールベースの場合の、加水日時による比較を示す。図より、加水当日に比べて、翌日になると、埋設物の反応が明確でなくなることが分かる。この理由は、周囲の土が非常に乾燥しているため、一時的に含水率を上げた箇所を作成しても、周囲土壌に水分が拡散してしまい、均一な含水状態が長くは保てないことが要因として考えられる。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。

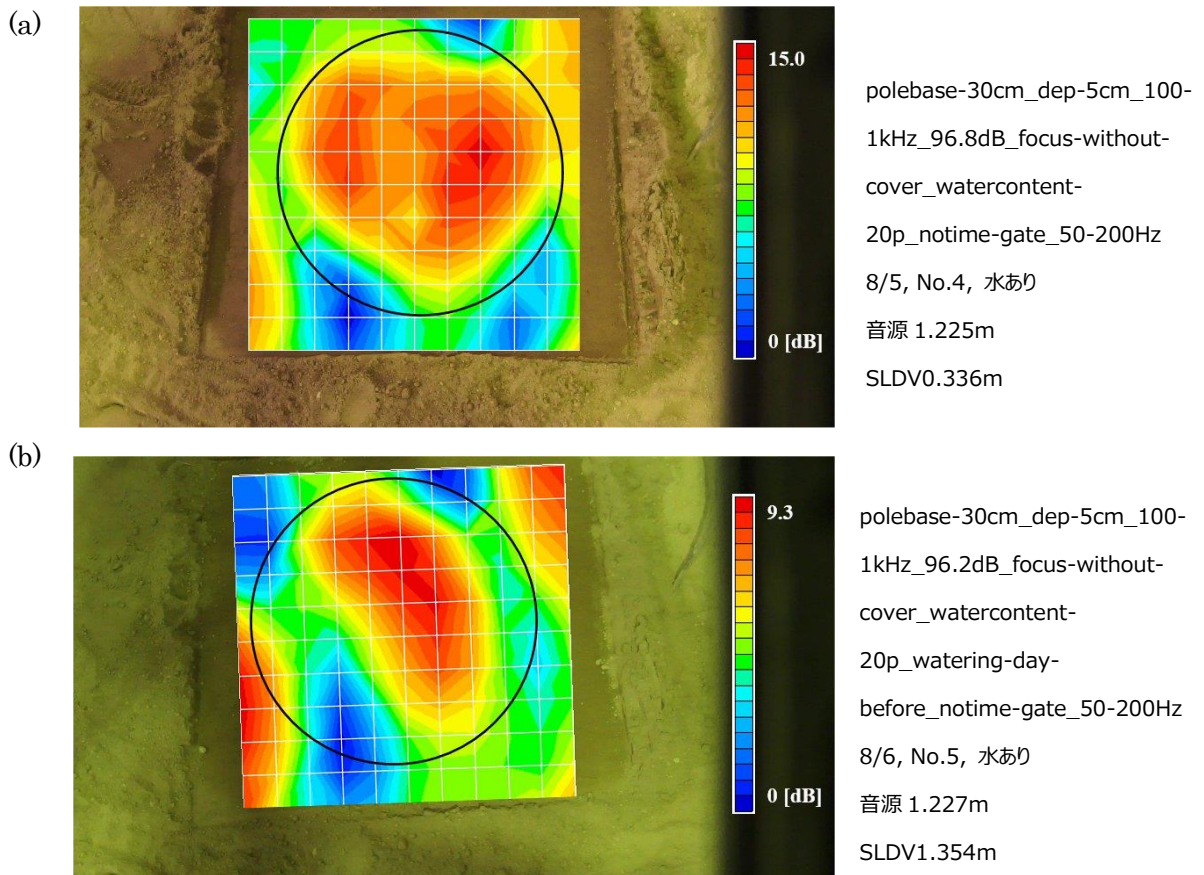


図 3.2.2.12 加水日時の比較、300 mm ポールベースの場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 加水当日 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 加水翌日 含水率 40% 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す。

## (実験結果・・・加水日時の比較\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.13 に埋設深さ 50 mm の直径 180 mm ホーロー容器の場合の加水日時による比較を示す。図より、加水当日に比べて、翌日になると埋設物の反応が明確でなくなることが分かる。この理由は、含水率差による周囲土壌への水分拡散が原因と思われる。参考のために(c)に加水領域を広げた場合の映像化例を示す。時間の関係で翌日計測ができていないが、広い領域で含水率を一定にできれば、安定した計測ができる可能性があると思われる。なお、使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。

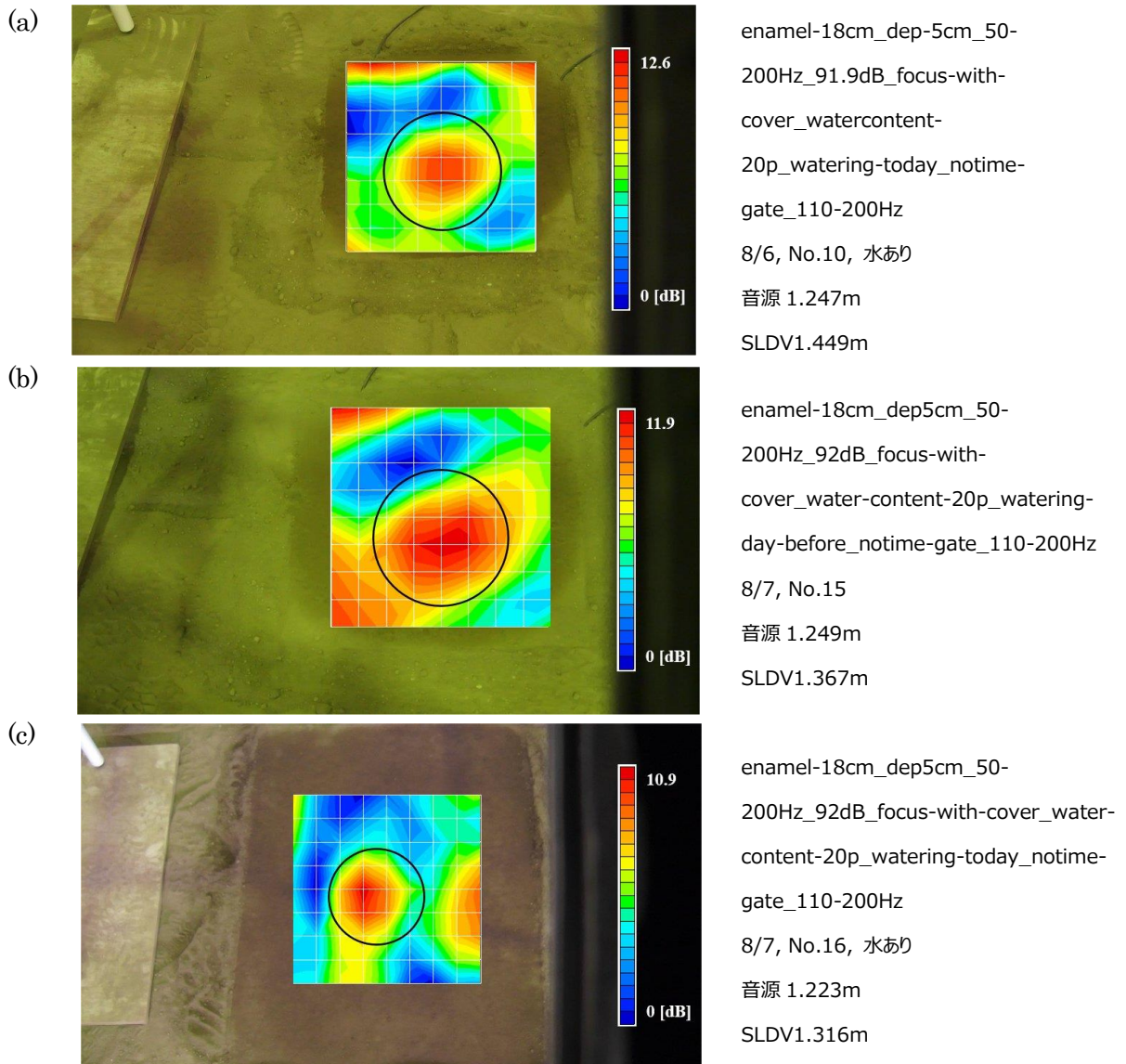


図 3.2.2.13 加水日時の比較、180 mm ホーロー容器の場合の振動エネルギー比による映像化例、(a) 加水当日 含水率 40% 映像化周波数範囲 110-200 Hz, (b) 加水翌日 含水率 40% 映像化周波数範囲 110-200 Hz, (c) 加水当日 含水率 40% 映像化周波数範囲 110-200 Hz、加水領域拡大



(実験結果・・・計測距離を変化させた場合 1\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.14 に埋設深さ 50 mm の直径 180 mm ホーロー容器の場合の、計測距離を 1, 3, 10 m と変化させた場合の比較を示す。距離が離れると LDV のレーザ光が地表面に入射する角度が小さくなっていくことになる。そのため、計測する向きが、音源の加振方向と異なることになり、検出感度が低下していくことが予想される。図より、3 m 程度の離隔ではほとんど検出感度に影響はなく、10 m 程度になると低下するものの検出自体は問題なく行えていることがわかる。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。なお、音源の高さは約 0.8 m である。

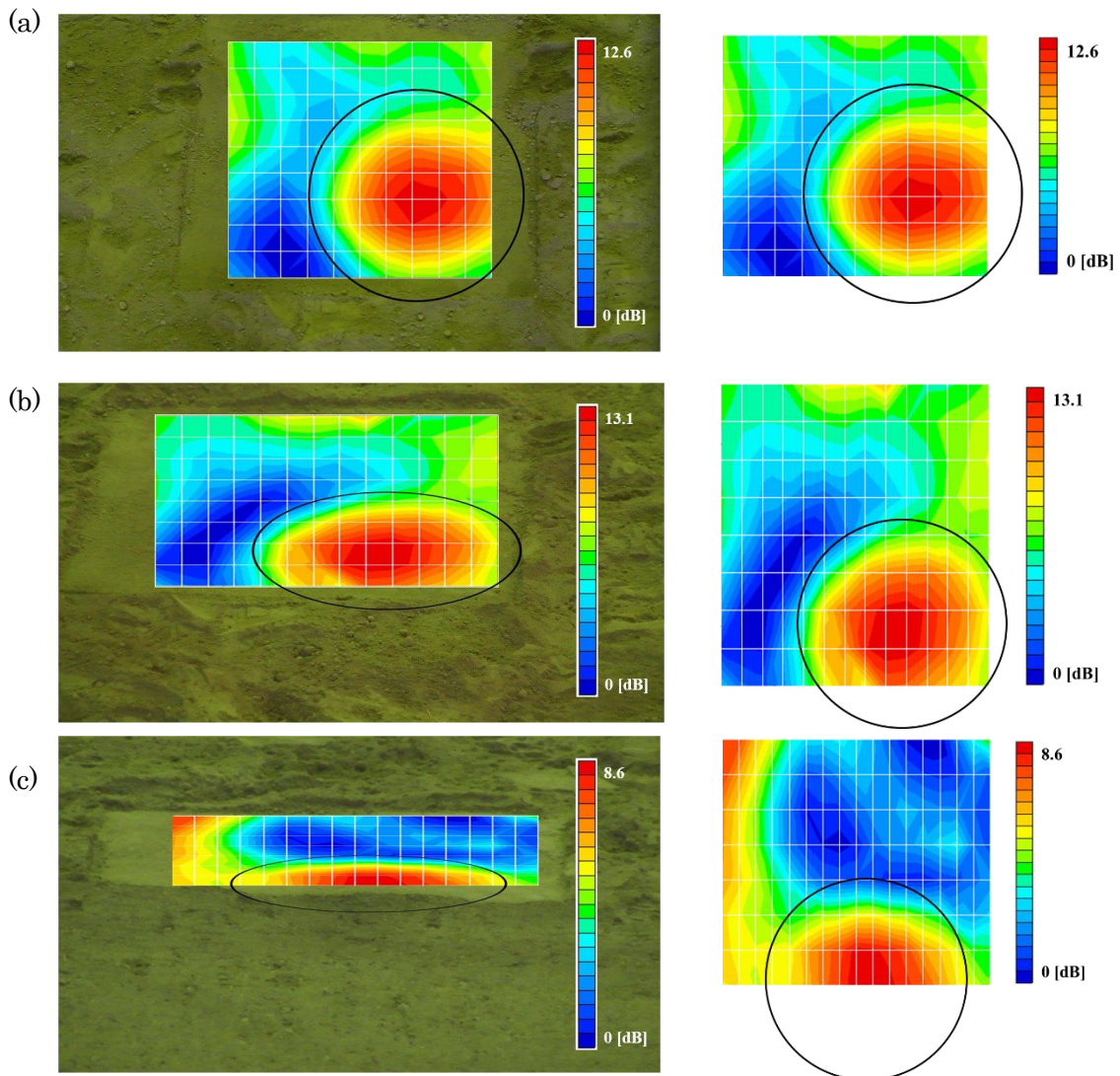


図 3.2.2.14 計測距離変化時の比較 1、180 mm ホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例、(a) 離隔 1 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 離隔 3 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (c) 離隔 10 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す (埋設深さ 50 mm、含水率 20%)。

(実験結果・・・計測距離を変化させた場合 2\_直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.2.15 に埋設深さ 50 mm の直径 180 mm ホーロー容器の場合の、計測距離を 10, 20, 30 m と変化させた場合の比較を示す。図より、距離が離れることにより、LDV のレーザー光が地表面に入射する角度が小さくなっていくため、音源の加振方向と異なることになり、検出感度が低下していく様子が見て取れる。ただし、LDV は通常の高さを 2 m 程度でしかない。大型の車両の上部に乗せて、高さを稼ぐことができれば、レーザー光の入射角を大きくすることができるため、遠距離からの計測時の映像が改善できる可能性がある。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。なお、音源の高さは約 0.8 m である。

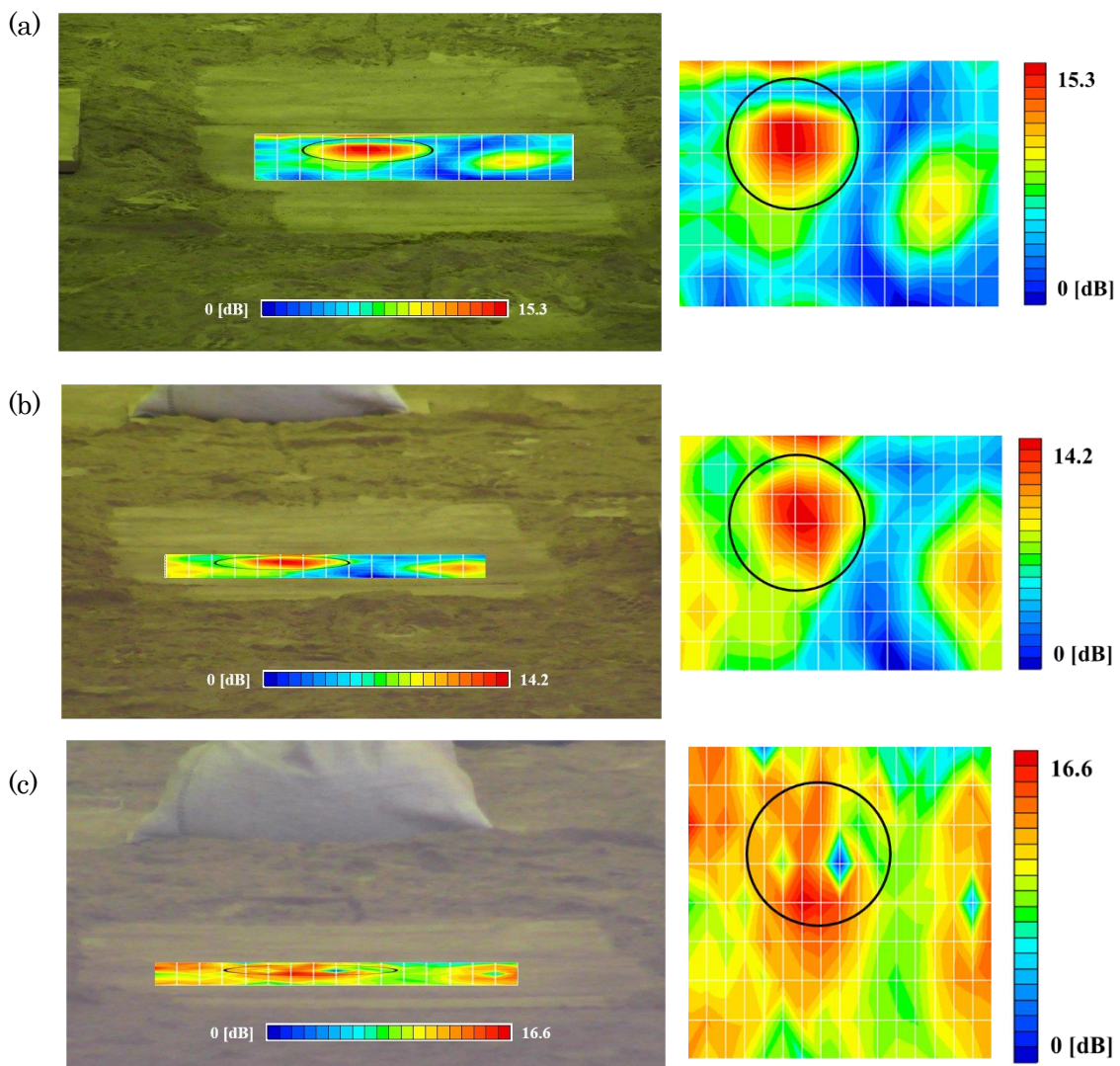


図 3.2.2.15 計測距離変化時の比較 2、180 mm ホーロー容器の振動エネルギー比による映像化例、(a) 離隔 10 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 離隔 20 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (c) 離隔 30 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す (埋設深さ 50 mm、含水率 20%)。

(実験結果・・・計測距離を変化させた場合\_直径 300 mm プラポールベース)

図 3.2.2.16 に埋設深さ 50 mm の直径 300 mm プラポールベースの場合の、計測距離を 10, 20, 30 m と変化させた場合の比較を示す。図より、距離が離れることにより、LDV のレーザ光が地表面に入射する角度が小さくなっていくため、音源の加振方向と異なることになり、検出感度が低下していく様子が見て取れる。ただし、どの距離でも埋設物の形状を反映して、ドーナツ状の円中央孔の振動が円周部より、小さくなっていることがわかる。使用波形は周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波である。なお、音源の高さは約 0.8 m である。

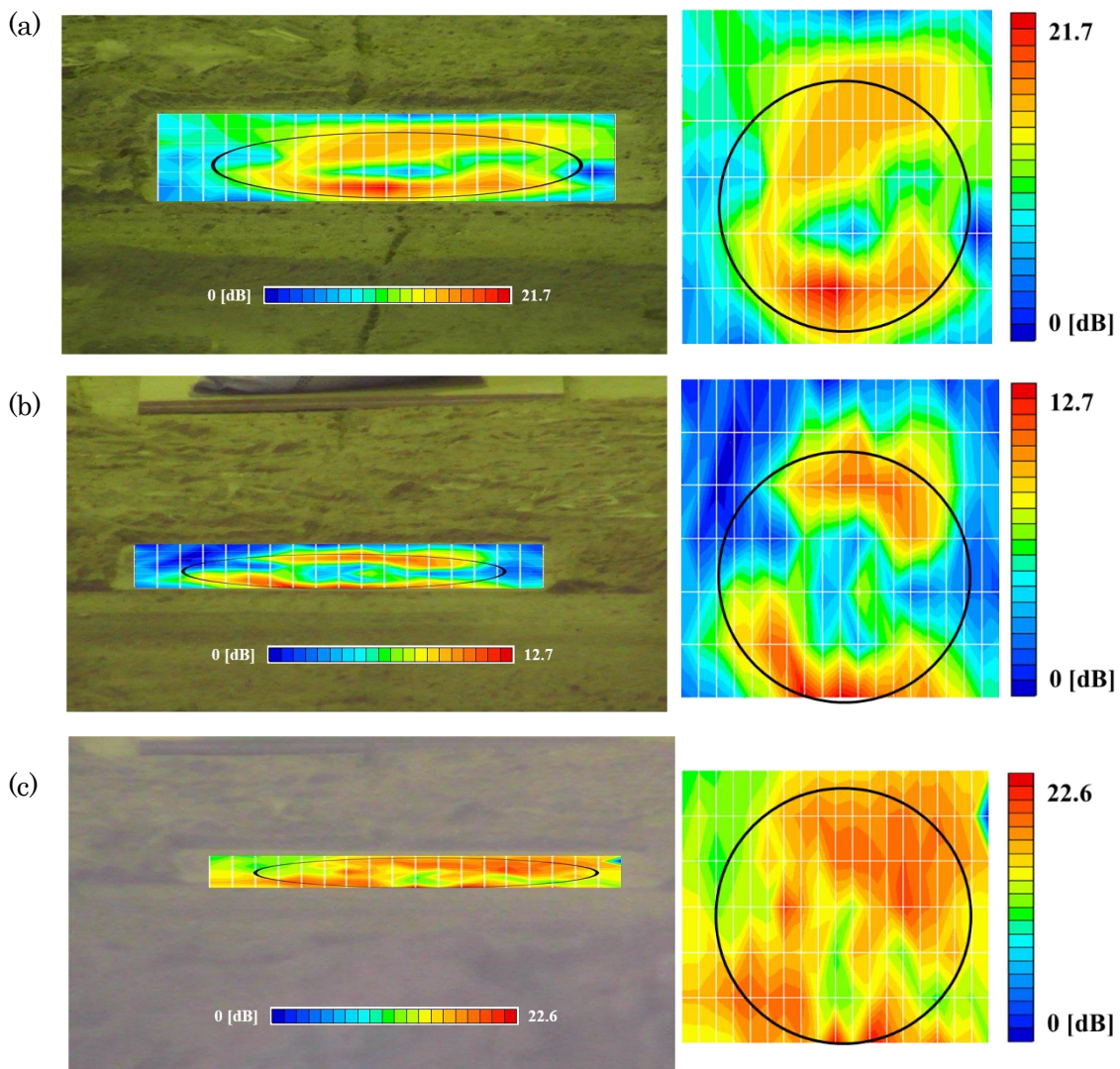


図 3.2.2.16 計測距離変化時の比較、300 mm プラポールベースの振動エネルギー比による映像化例、(a) 離隔 10 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (b) 離隔 20 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, (c) 離隔 30 m 映像化周波数範囲 50-200 Hz, 黒円は埋設物の位置と大きさを示す (埋設深さ 50 mm、含水率 20%)。

## (まとめ)

陸上装設備研究所・土槽管理室内の乾燥したローム土内に埋設した埋設物に対して、音波照射加振を用いた非接触音響探査法を用いた探査を実施した。乾燥した状態のローム土（含水率約 20%）では、土表面にある粒子が音波照射により揺れやすい状態であったが、そのような状態であっても深さ 50 mm では直径 180~300 mm の埋設物の映像化が可能であることを確認した。深さ 100 mm では、直径 300 mm の埋設物は振動しやすい周波数を送波すれば映像化が可能であったが、直径 180 mm では土表面の振動と埋設物真上の振動が同程度であったために、検出は困難であった。これは土の締固め具合が影響していると思われるため、含水率を 40%に上げた場合の計測を実施した。土表面の粒子の振動を抑えることができたため、含水率を 40%に上げた場合には直径 100 mm の埋設物でも明瞭な検出が行えた。ただし、周囲が乾燥しているために、翌日になると含水率の分布が変化してしまい検出映像が変化することも明らかになった。さらに計測距離を変えた場合は、三脚に乗せた LDV の高さが 2 m 程度であっても、離隔 20 m 程度までは問題なく映像化が可能であった。離隔 30 m になると、LDV によるレーザ光が地表面へ入射する際の角度が小さくなりすぎるために映像結果が劣化したが、これはあくまでも入射角度の問題であるため、車両上部に機材を設置するなどして、高さを稼ぐことにより、改善される可能性がある。また、この距離を変化させる実験は、準備の都合上、すべて含水率 20%のまま実施されている。したがって、含水率を上げて、もう少し締固まった状態の土であれば、さらに S/N 比が向上する可能性が高いと思われる。



(実験時参考写真 A : 遠距離計測時 (離隔 10 m) 時の機材配置例、2019 年 8 月 6 日)

### 3.2.2.2 つくばの埋設物試験場 2 における基礎実験 1 (直径 300 mmポールベース) (実験セットアップ)

相模原からつくばに移送された関東ローム土中に埋設された直径 300 mm のポールベースにおいて、埋設深度を変化させた影響について検討を行った(2020年10月13日実施)。実験風景写真を図 3.2.2.17、ポールベースの埋設位置イメージ図を Fig.3.2.2.18 に示す。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。図中における括弧内の数値は、計測後に調べた実測値である。実験では計測時間短縮のため、一方向からの計測であったため対象の埋設物により計測距離に差異が存在する。実験時のセットアップ図を図 3.2.2.19 および図 3.2.2.20 に示す。加振用音源である平面音源はイレクターパイプにより組まれた台の上に固定し、振動計測用のレーザヘッドは供試体の傍らに配置し斜めからの計測が行われた。加振用波形としては、周波数範囲 50-152 Hz のシングルトーンバースト波を使用した。使用波形および波形設定を図 3.2.2.21 に示す。埋設深度別の計測時の設定について表 3.2.2.1 に示す。

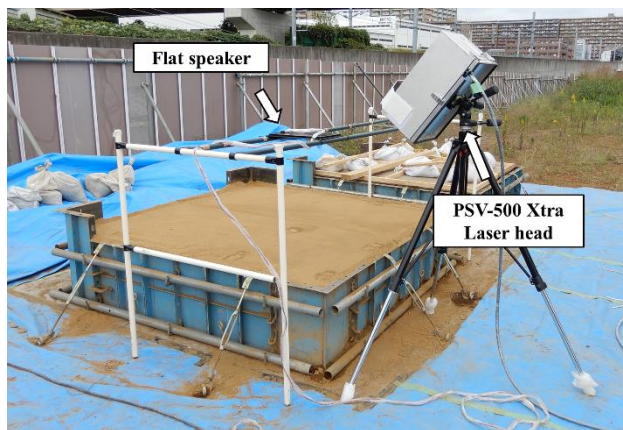


図 3.2.2.17 実験風景写真

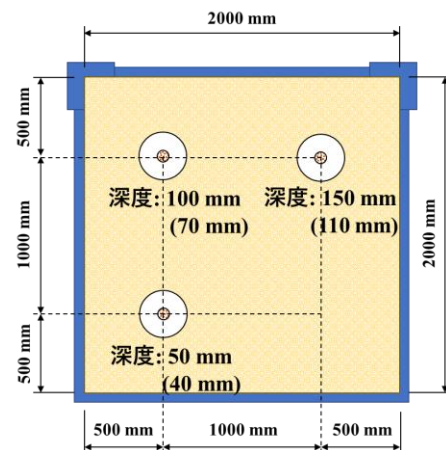


図 3.2.2.18 埋設位置イメージ図

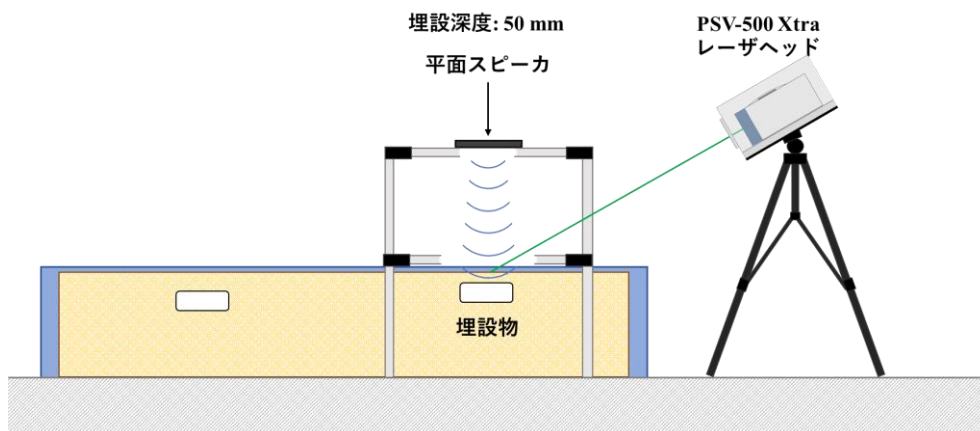


図 3.2.2.19 実験セットアップ図：埋設深度 50 mm

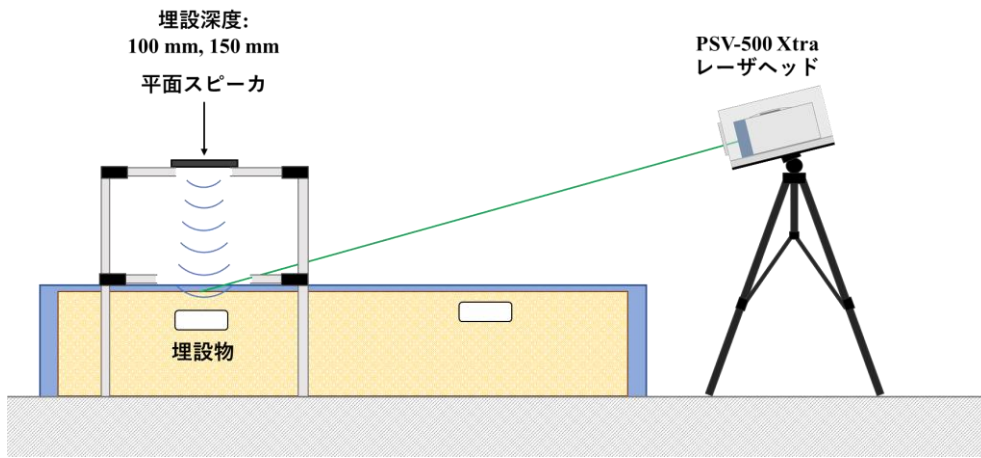
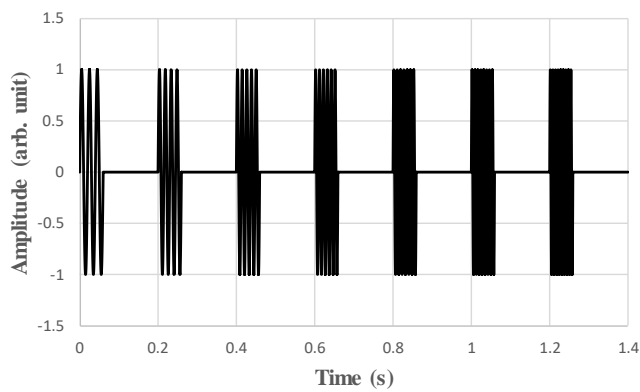


図 3.2.2.20 実験セットアップ図：埋設深度 100 mm, 150 mm



周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.2.2.21 使用波形：シングルトーンバースト波 50-152 Hz

表 3.2.2.1 計測設定

シングルトーンバースト波: 50-152 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm
レーザー距離 [m]	1.15	2.02	1.93
音源距離 [m]	0.68	0.67	0.67
加算平均回数	5	5	5
最大音圧 [dB]	99.0	99.0	99.0
計測ポイント数	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

計測対象ごとの計測範囲図を図 3.2.2.22～図 3.2.2.24 に示す。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。計測範囲としては 400 mm～550 mm 程度に設定されており、埋設物である直径 300 mm のポールベースが十分に計測範囲に入る大きさになっている。また、計測密度に関しても 40 mm～70 mm 程度の間隔になっており、埋設物を検出するために必要な間隔になっている。

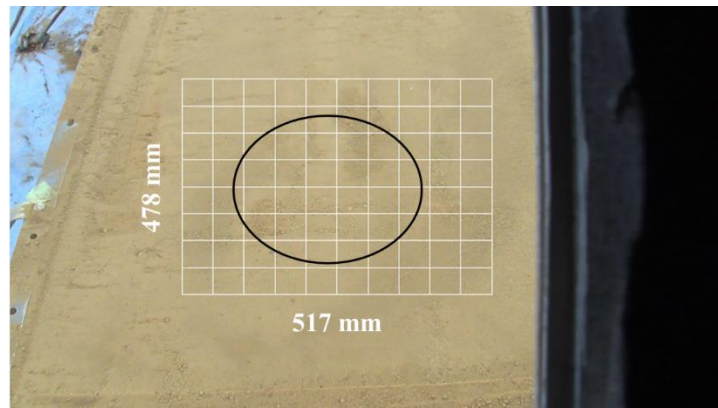


図 3.2.2.22 計測範囲図：埋設深度 50 mm

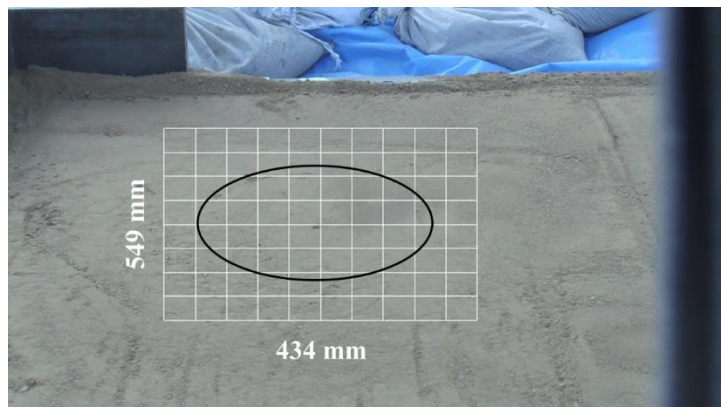


図 3.2.2.23 計測範囲図：埋設深度 100 mm

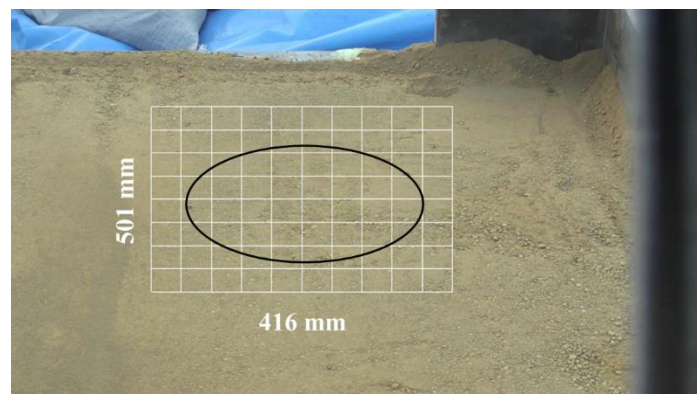


図 3.2.2.24 計測範囲図：埋設深度 150 mm

**(振動エネルギー比分布)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.2.25～図 3.2.2.27 に示す。解析時には周波数フィルター(50-152 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm および 100 mm の結果では、埋設物の反応が明確に検出されている。しかし、埋設深度 150 mm は全体的に振動エネルギーが高く埋設物を判別するのが困難な状態である。これは、比をとるときの基準点が著しく低い事が影響している部分もあるが、埋設物上と周囲の点で余り差異が見られないことから、単純に振動エネルギー比を使用しただけでは埋設物の判断が難しいことを示している。

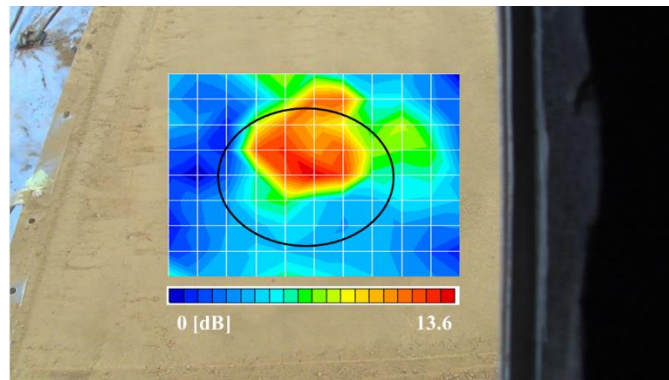


図 3.2.2.25 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 50 mm

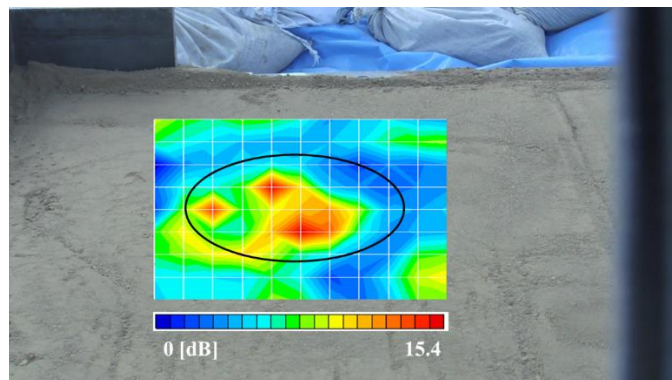


図 3.2.2.26 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 100 mm

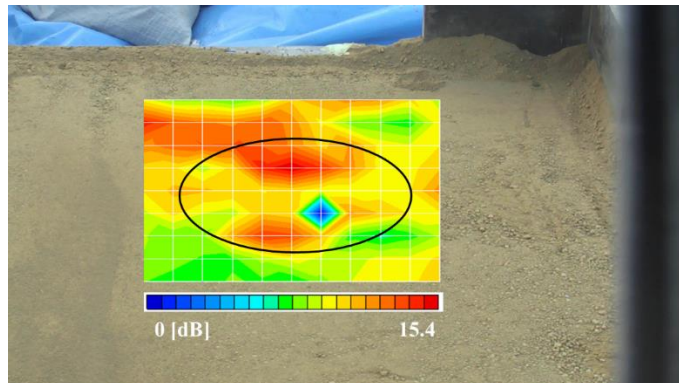


図 3.2.2.27 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 150 mm



### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物上の代表点における生データの振動速度波形を図 3.2.2.28 に、振動速度スペクトルを図 3.2.2.29 に示す。振動速度波形においては、150 mm の結果で振幅の低下が見られるが、100 mm の結果で一部振幅の増加が存在しており、埋設深度との関連性は確認できない。振動速度スペクトルを比較した場合では、100 Hz 辺りに存在する卓越した反応において、埋設深度の増加に反比例する形で振動速度が低下する傾向が得られた。ただし、埋設深度 100 mm の結果では他とは異なり大きな反応が二つ検出された。これは、埋設されているポールベースの形状が影響していると考えられる。

次に計測点(99ポイント)における全点平均の振動速度波形を図 3.2.2.30、振動速度スペクトルを図 3.2.2.31 に示す。全点平均においても、埋設深度の違いによる振動速度の明確な差異は判別が困難である。特に、振動速度スペクトルでは代表点と比較して細かい反応が増加しており、単純な比較が難しくなっている。

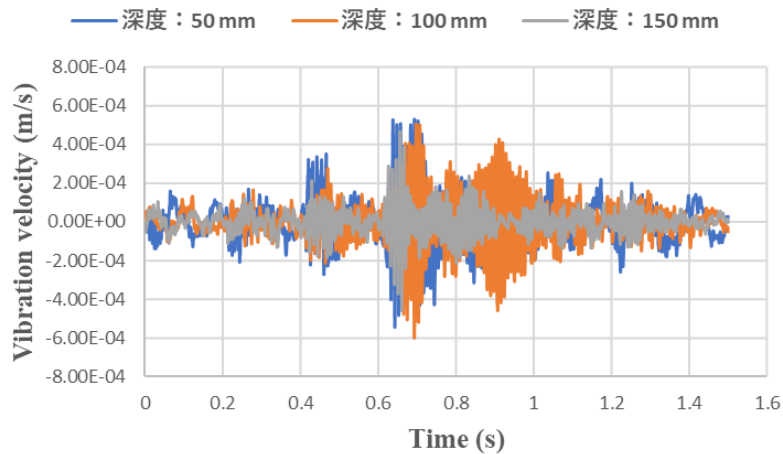


図 3.2.2.28 振動速度波形：代表点、300 mm ポールベース

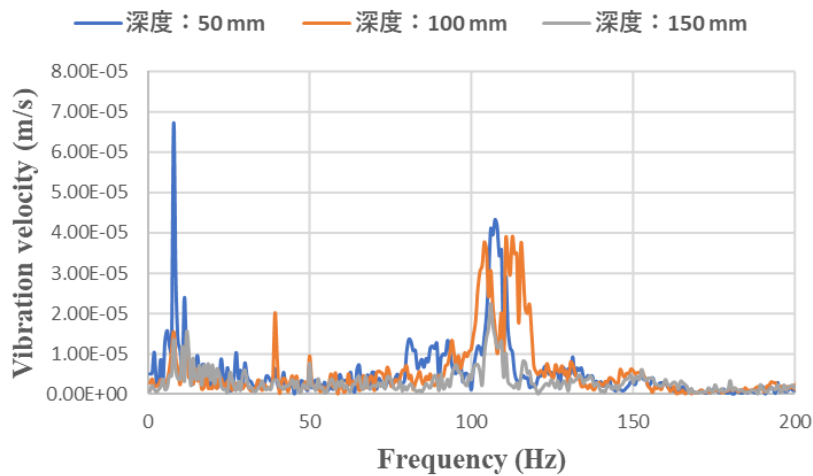


図 3.2.2.29 振動速度スペクトル：代表点、300 mm ポールベース

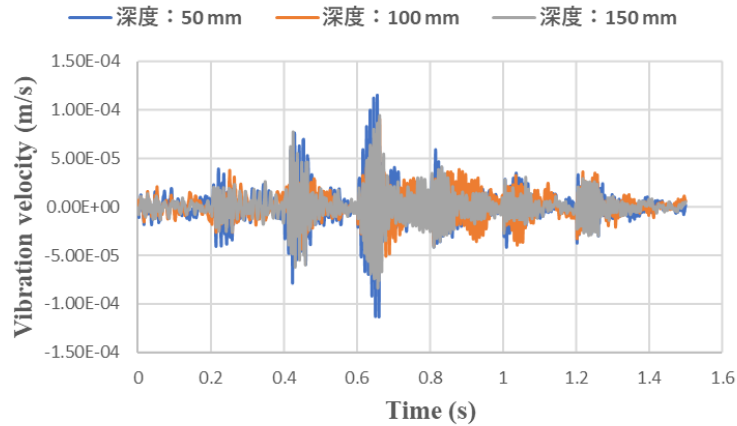


図 3.2.2.30 振動速度波形：全点平均、300 mm ポールベース

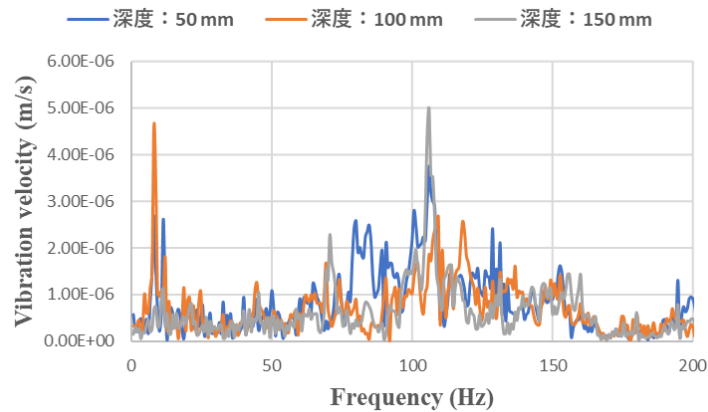


図 3.2.2.31 振動速度スペクトル：全点平均、300 mm ポールベース

### 3.2.2.3 つくばの埋設物試験場 2 における基礎実験 1 (直径 180 mm ホーロー容器) (実験セットアップ)

関東ロームに埋設された直径 180 mm のホーロー容器において、埋設深度を変化させた影響について検討を行った (2020 年 10 月 20 日実施)。実験風景写真を図 3.2.2.32、ポールベースの埋設位置イメージ図を図 3.2.2.33 に示す。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。図中における括弧内の数値は、計測後に調べた実測値である。実験時のセットアップ及び使用波形は前節と同じである。埋設深度別の計測時の設定について表 3.2.2.2 に示す。

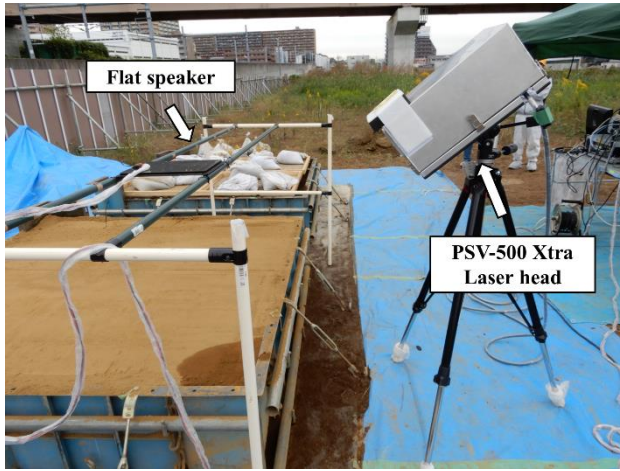


図 3.2.2.32 実験風景写真

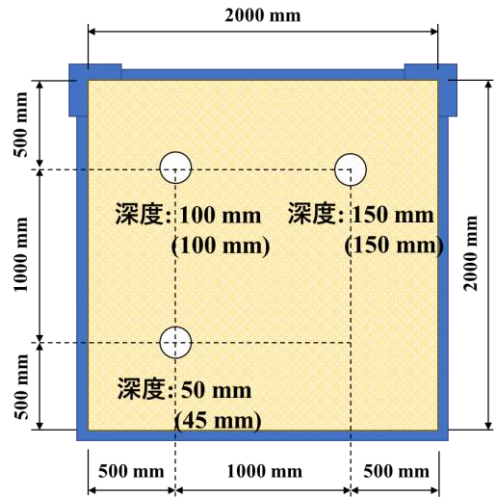


図 3.2.2.33 埋設位置イメージ図

表 3.2.2.2 計測設定

シングルトーンパースト波: 50-152 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm	埋設物無し
レーザ距離 [m]	1.13	1.97	2.01	1.13
音源距離 [m]	0.68	0.69	0.68	0.67
加算平均回数	5	5	5	5
最大音圧 [dB]	97.8	97.8	97.8	97.8
計測ポイント数	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9

計測対象ごとの計測範囲図を図 3.2.2.34～図 3.2.2.36 に示す。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。計測範囲としては 260 mm～330 mm 程度に設定されており、埋設物である直径 180 mm のホーロー容器が十分に計測範囲に入る大きさになっている。また、計測密度に関しても 30 mm～40 mm 程度の間隔になっており、埋設物を検出するために必要な間隔になっている。

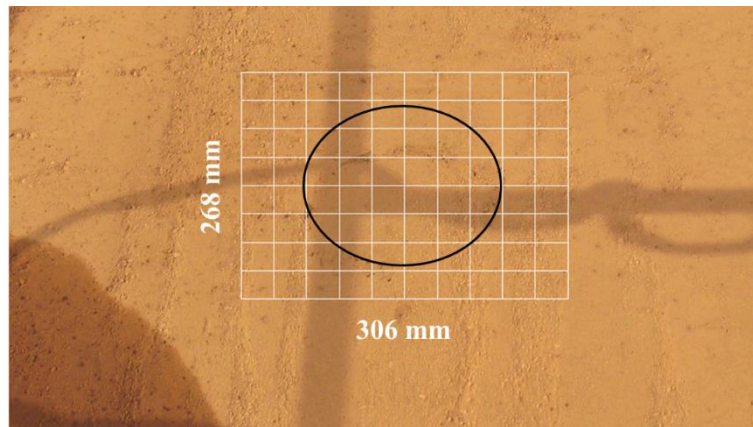


図 3.2.2.34 計測範囲図：埋設深度 50 mm

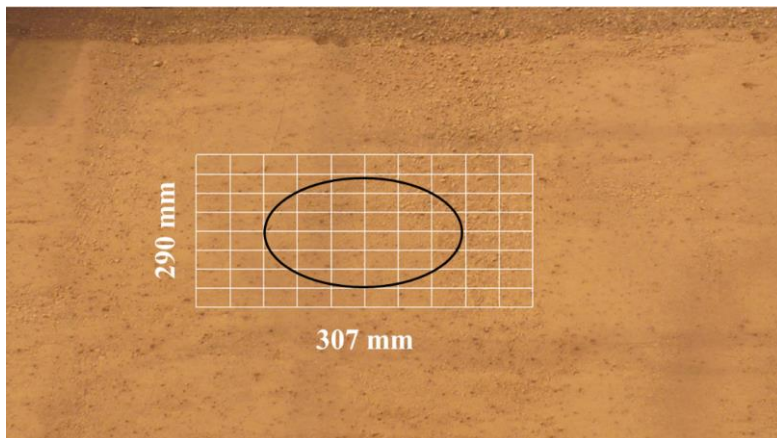


図 3.2.2.35 計測範囲図：埋設深度 100 mm

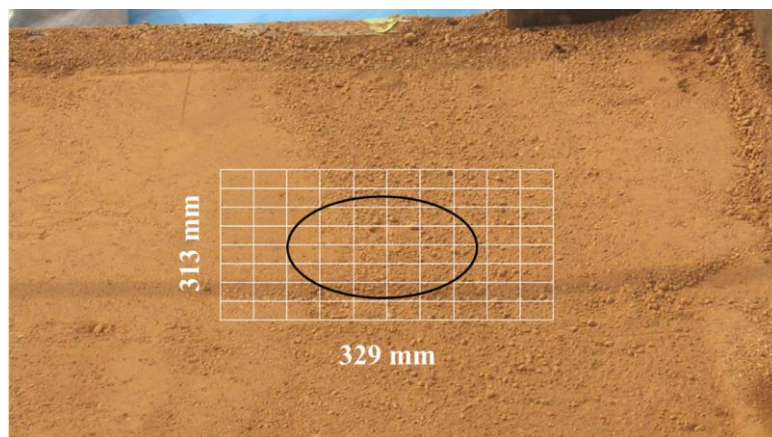


図 3.2.2.36 計測範囲図：埋設深度 150 mm

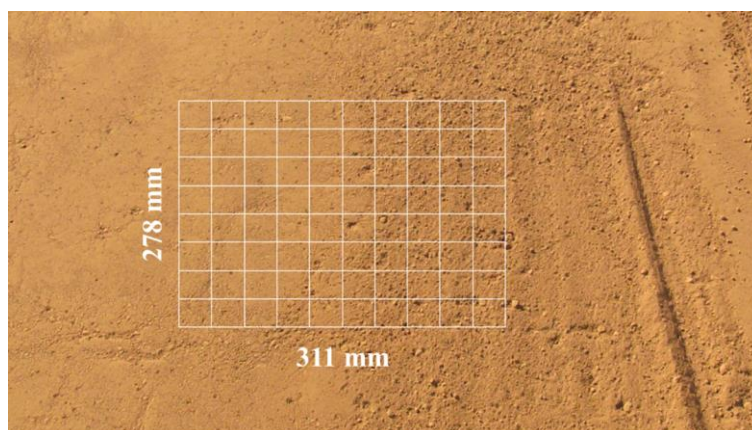


図 3.2.2.37 計測範囲図：埋設物無し

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.2.38～図 3.2.2.41 に示す。解析時には周波数フィルター(50-152 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm に関しては、埋設物の反応が確認できるが、100 mm および 150 mm の結果では明確に埋設物と断定するには困難な反応であった。原因の一つとして土の表面の状態が影響していると考えられる。特に 150 mm の土の表面において左側は概ね平らだが、右側は大きな粒が表面を覆っており、それがレーザ計測に悪影響を与えている可能性が高い。図 3.2.2.40 の分布を見てみると、右側の方は全体的に振動エネルギーが高くなっており、土の状態と一致している。これは埋設物の無しの結果にも言えることであり、土の状態が計測結果に大きな影響を与えていることが分かる。

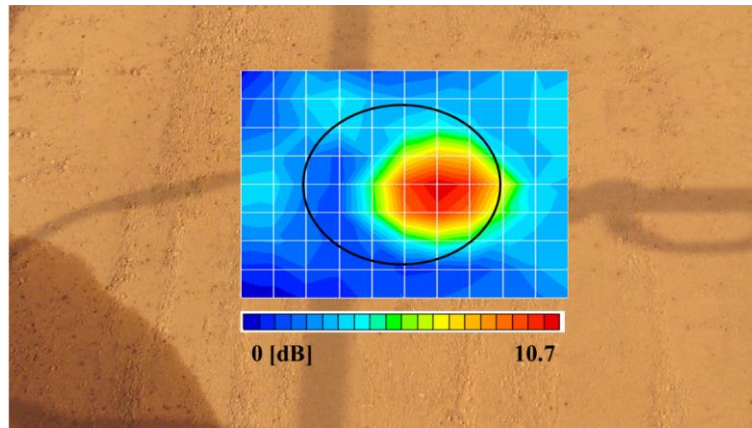


図 3.2.2.38 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 50 mm

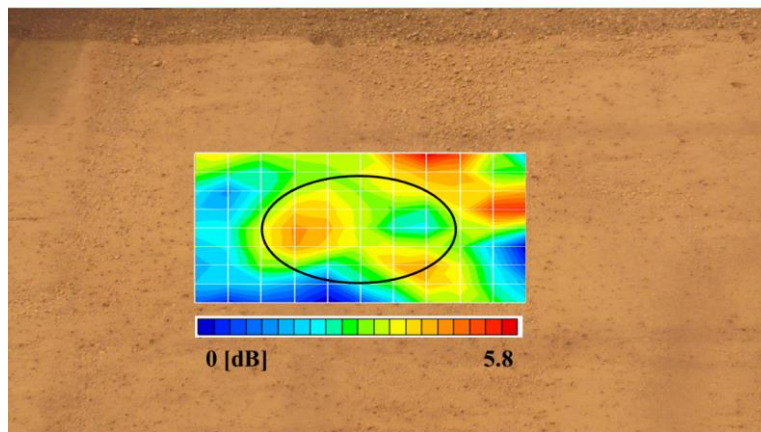


図 3.2.2.39 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 100 mm

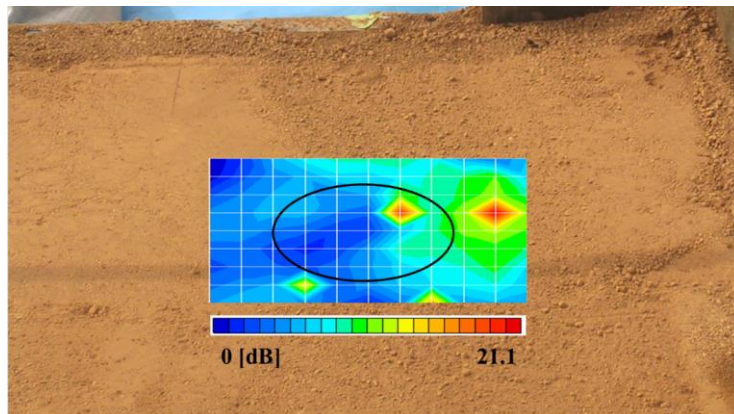


図 3.2.2.40 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設深度 150 mm

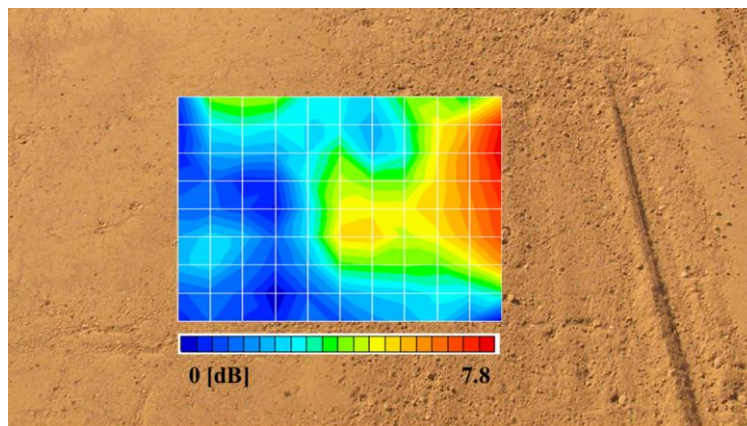


図 3.2.2.41 振動エネルギー比分布：50-152 Hz、埋設物無し

#### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物上の代表点における生データの振動速度波形を図 3.2.2.42、振動速度スペクトルを図 3.2.2.43 に示す。埋設深度 50 mm においては、広い周波数帯で埋設物の反応が検出されている。100 mm および 150 mm では、範囲は狭いが卓越した反応が確認できる。

次に計測点(99 ポイント)における全点平均の振動速度波形を図 3.2.2.44、振動速度スペクトルを図 3.2.2.45 に示す。全点平均すると埋設物無しも含め 100 Hz 付近を中心に値が山なりに像がしており、単純な判別は難しくなっている。ただし、埋設深度 50 mm のスペクトルにおける 80 Hz および 90 Hz 付近の卓越した反応は埋設物の振動であり、明確に判別可能である。

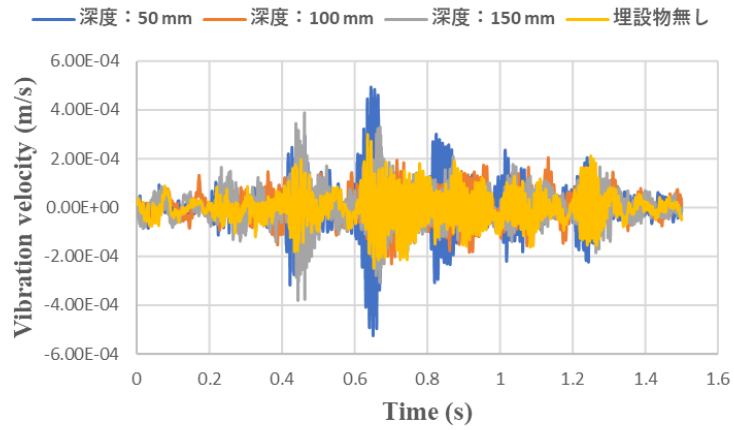


図 3.2.2.42 振動速度波形：代表点、180 mm ホーロー容器

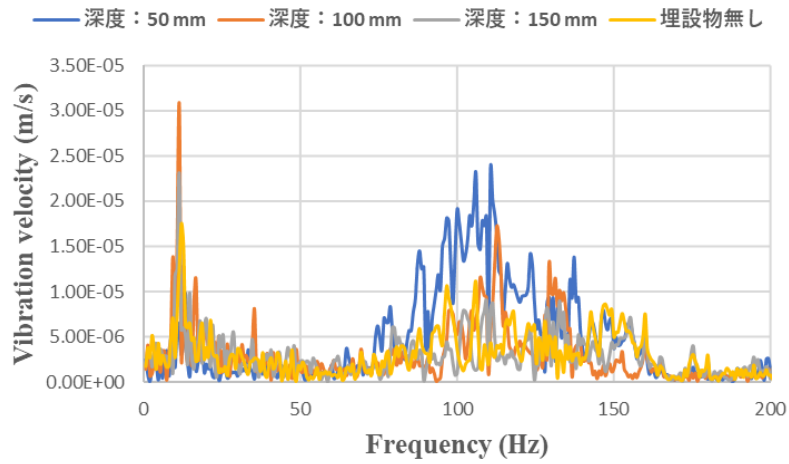


図 3.2.2.43 振動速度スペクトル：代表点、180 mm ホーロー容器

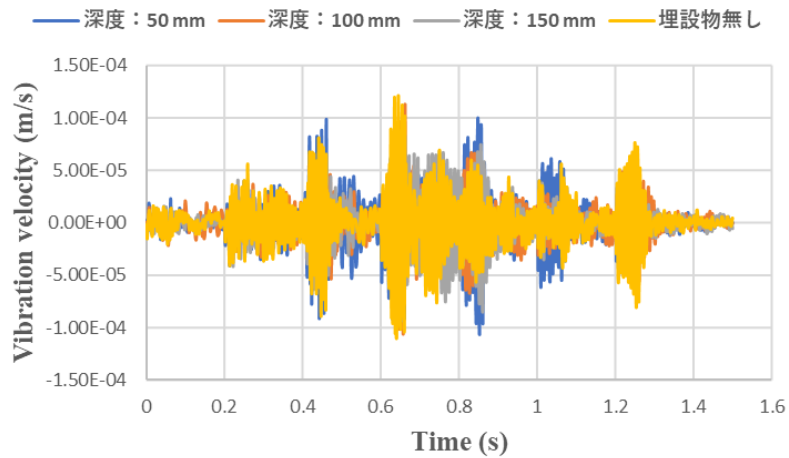


図 3.2.2.44 振動速度波形：全点平均、180 mm ホーロー容器

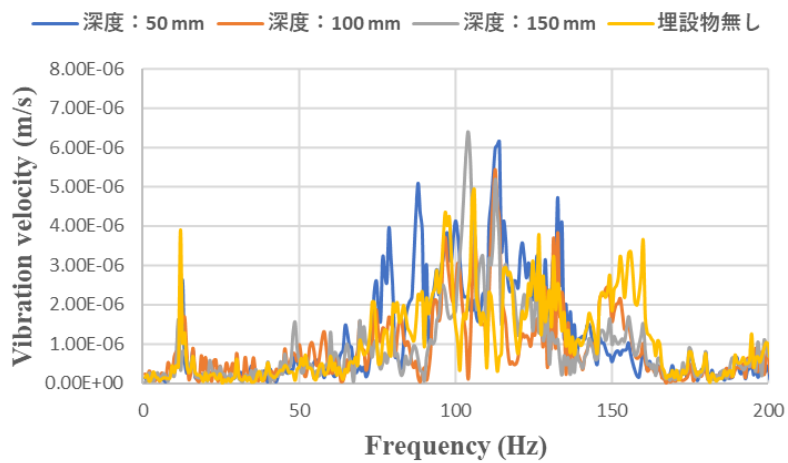


図 3.2.2.45 振動速度スペクトル：全点平均、180 mm ホーロー容器



### 3.2.3 シルト（つくば表層土）の場合

#### 3.2.3.1 つくばの埋設物試験場 1 における基礎実験

##### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/01/22 のつくばの造成地において測定されたものである。埋設物は直径 300 mm の中空プラポールベースとし、埋設した深さは土壌表面から約 50, 100, 150 mm とした。実験セットアップを図 3.2.3.1 に示す。埋設物の直上の約 1 m に音源を設置し、埋設物から約 2 m の離隔でレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー (FPS INC, FPS2030M3P1R) であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra (Polytec Corp.) を使用した。なお、実験当日は時折小雨が降るような状況であったために、念のため、レーザドップラ振動計にはビニールをかけて測定した。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用い、地表面付近の音圧は約 92.5 dB とした。

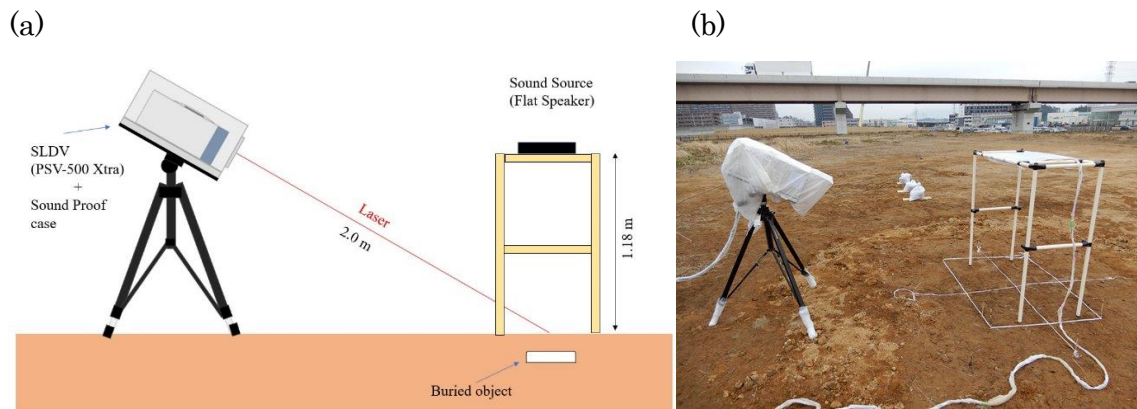


図 3.2.3.1 つくば造成地における実験セットアップ図

(a) 実験セットアップ図、(b) 実験時の写真

##### (実験結果・・・深さ 50 mm)

深さ 50 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.2.3.2 に示す。



図 3.2.3.2 スキャンエリア図 (9×11=99 points)

計測点数は 99 (=9x11) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.3 に示す。

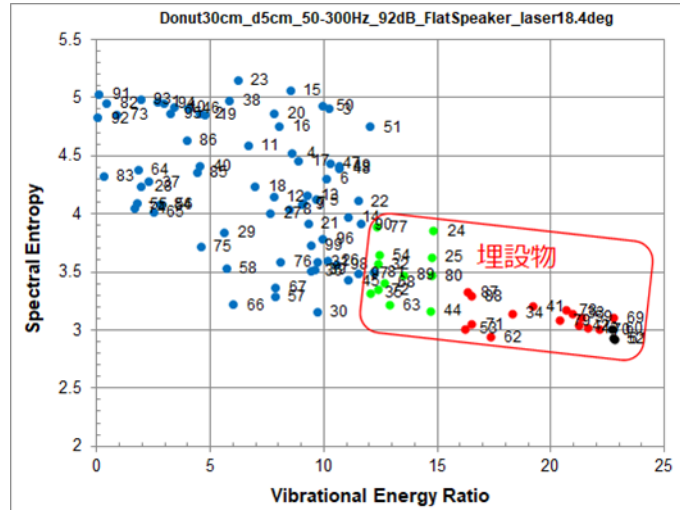


図 3.2.3.3 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

図より、埋設物上の計測点（赤点）では、振動エネルギー比が高くかつスペクトルエントロピーが低いという典型的な欠陥部の特徴を示していることがわかる。埋設物の周辺部の計測点（緑色）は埋設物上以外の計測点（青色）と埋設物上の計測点（赤点）の中間領域にあるため、比較的良好な埋設物探査が行えていることがわかる。埋設物上以外の計測点（青色）はややバラつきが大きいですが、これは土壌表面の締固め具合や表面に存在する細かい土粒子や小石等の影響によるものと思われる。次に振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.4 に示す。

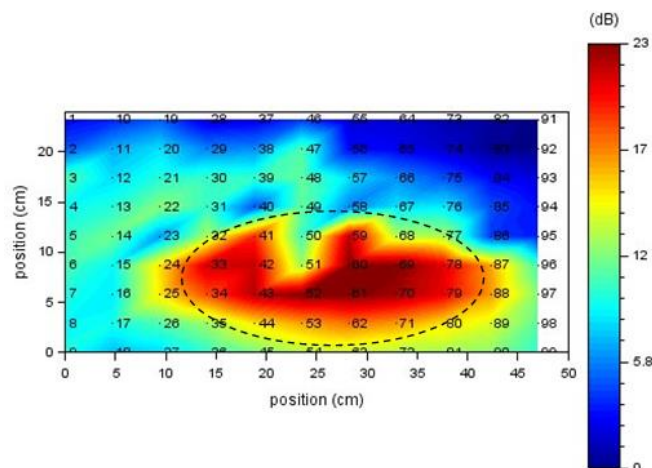


図 3.2.3.4 振動エネルギー比分布図（黒破線は埋設物の位置と大きさを示す）

図より、埋設物付近の振動エネルギー比が高いことが確認できる。

(実験結果・・・深さ 100 mm)

深さ 100 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.2.3.5 に示す。



図 3.2.3.5 スキャンエリア図 (9×15=135 points)

計測点数は 135 (=9×15) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.6 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.7 に示す。

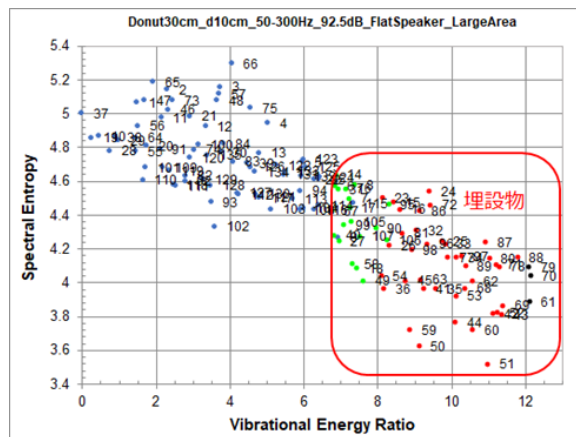


図 3.2.3.6 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

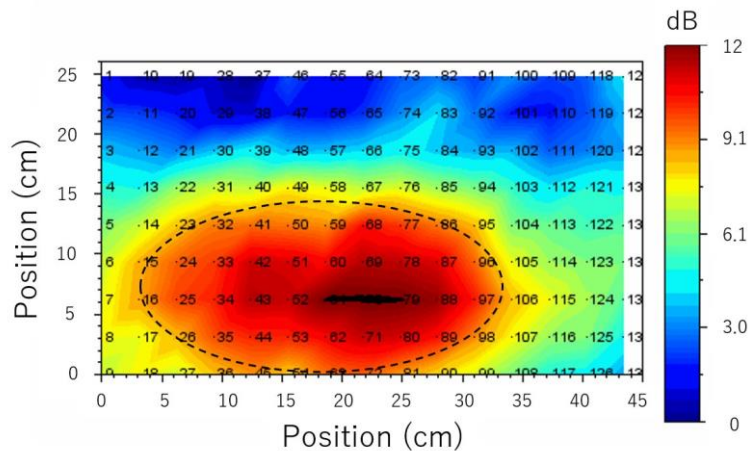


図 3.2.3.7 振動エネルギー比分布図 (黒破線は埋設物の位置と大きさを示す)

(実験結果・・・深さ 150 mm (その 1))

深さ 150 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.2.3.8 に示す。



図 3.2.3.8 スキャンエリア図 (9×15=135points)

計測点数は 77 (=7×11) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.9 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.10 に示す。

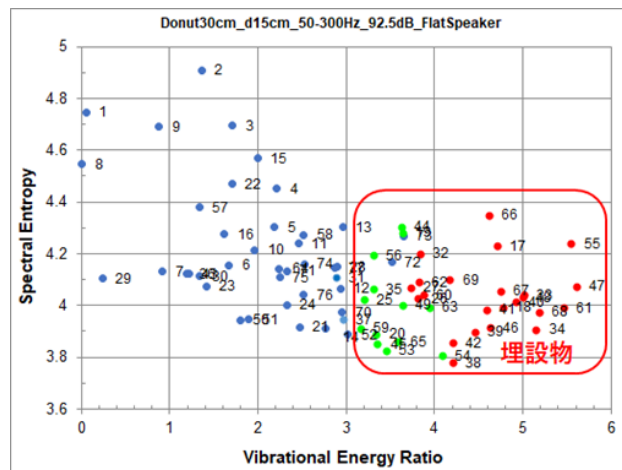


図 3.2.3.9 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

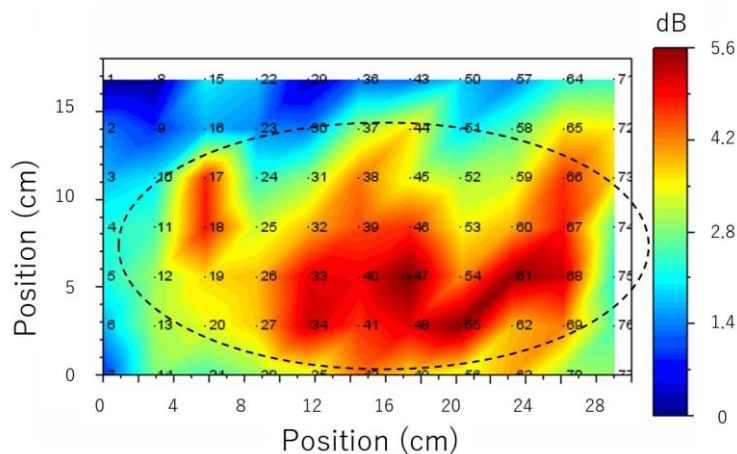


図 3.2.3.10 振動エネルギー比分布図 (黒破線は埋設物の位置と大きさを示す)

(実験結果・・・深さ 150 mm (その 2) )

同じ埋設物上で、スキャンエリアを拡大した際のスキャンエリアを図 3.2.3.11 に示す。



図 3.2.3.11 スキャンエリア図 (9×15=135points)

計測点数は 135 (=9×15) ポイントである。白いビニール線の交点はおよその埋設位置を示している。計測データにより得られた振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.2.3.12 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.2.3.13 に示す。

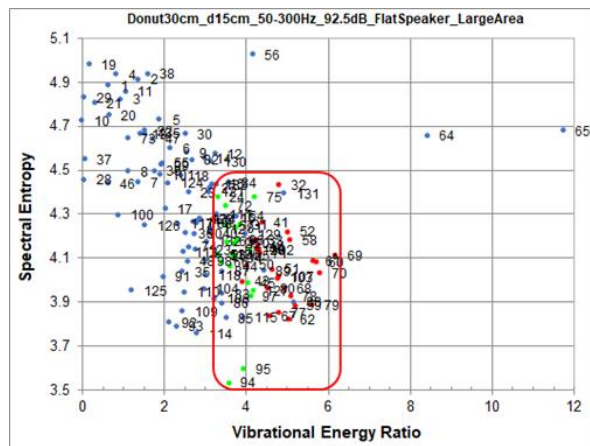


図 3.2.3.12 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

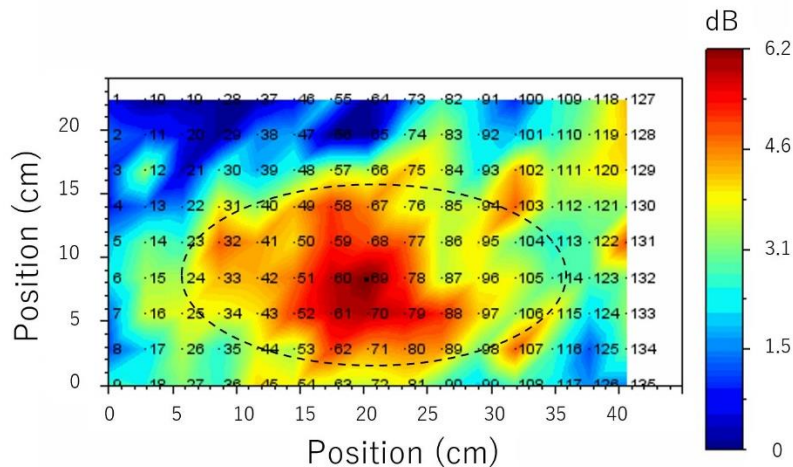


図 3.2.3.13 振動エネルギー比分布図 (黒破線は埋設物の位置と大きさを示す)

## (まとめ)

つくば造成地の表層土に直径 300 mm の中空プラポールベースを深さ 50~150 mm に埋設した場合の探査実験を、音源を高さ約 1 m に固定した場合について実施した。実験結果から、直径 300 mm の埋設物の場合には深さ 150 mm でも検出可能であることが確認できた。

## 3.2.3.2 厚木の埋設物試験場における基礎実験

## (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/02/04 の佐藤工業(厚木)の埋設物試験場で測定されたものである。ただし、土壌としてはつくばの造成地における表層土(シルト)を用いている。埋設物は直径 180 mm のホーロー容器とし、埋設した深さは土壌表面から約 50,100,150 mm とした。実験セットアップを図 3.2.3.14 に示す。埋設物の直上の約 1 m に音源を設置し、約 1.5 m にレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra を使用した。また、測定前には、土の上に板と砂利を詰めた袋を置いて加圧を行っている(約 2×1 m<sup>2</sup>のコンパネ板 2 枚に、土嚢袋 5 kg×24 個を乗せた)。

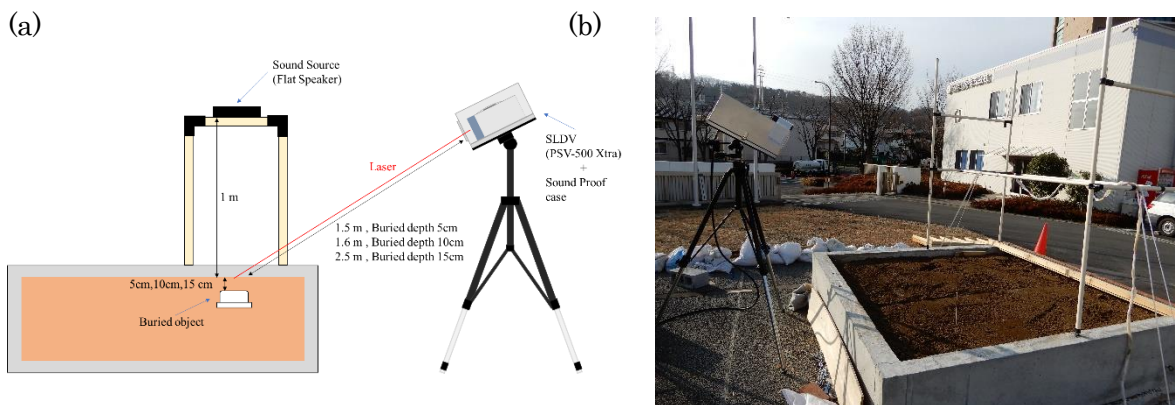


図 3.2.3.14 実験セットアップ

(a)実験セットアップ図、(b)実験風景

測定に使用した音波はマルチトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 50 Hz ~ 300 Hz、変調周波数 25 Hz、パルス幅 20 ms、波形の長さは 250 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 94.3 dB である。図 3.2.3.15 に波形例を示す。

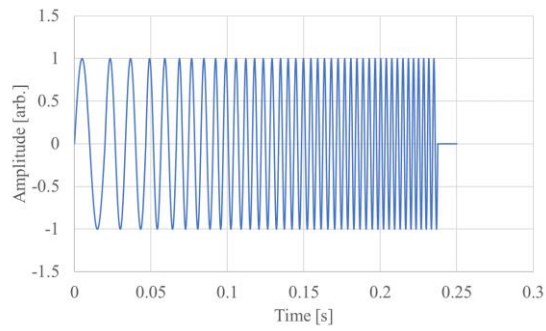


図 3.2.3.15 送信波形例

また、図 3.2.3.16 に測定エリアを示し、表 3.2.3.1 に測定点数と測定点間隔を示す。

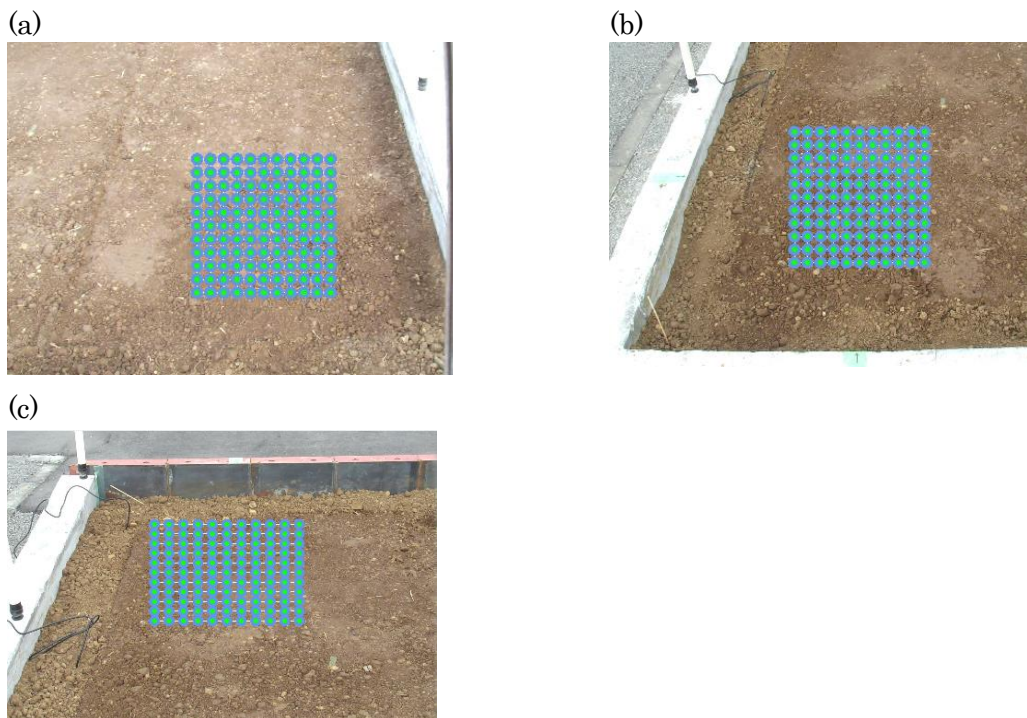


図 3.2.3.16 測定エリア

(a)埋設深さ 50 mm、(b) 埋設深さ 100 mm、(c) 埋設深さ 150 mm

表 3.2.3.1 測定点数と測定点間隔

Buried depth [cm]	Measurement Points	Distance between measurement points	
		Horizontal [cm]	Vertical [cm]
5	121 (11×11)	3.5	3.5
10	121 (11×11)	3.7	3.8
15	121 (11×11)	4.4	2.9

(実験結果・・・直径 180 mm ホーロー容器)

図 3.2.3.17 に振動エネルギー分布を示す。積分範囲は 50~300 Hz であり、照射音波の帯域と同じ帯域とした。カラースケールは各測定場所の最大最小値となっている。

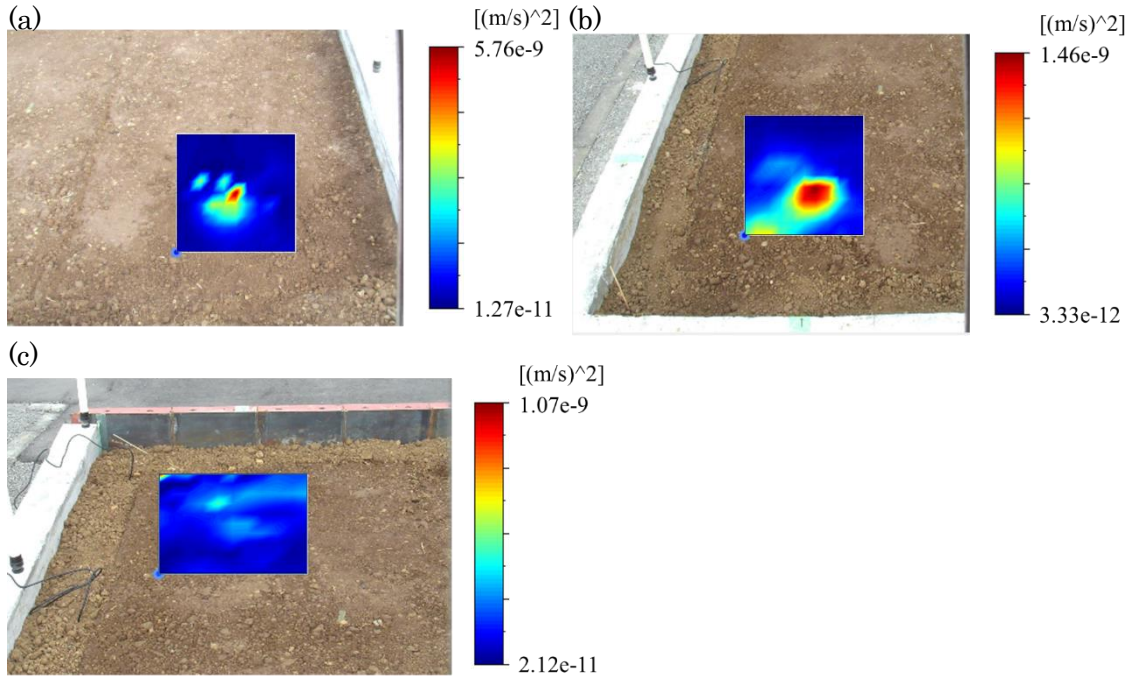


図 3.2.3.17 振動エネルギー分布

(a)埋設深さ 50 mm、(b) 埋設深さ 100 mm、(c) 埋設深さ 150 mm

図 3.2.3.17 より埋設物の深さが 50 mm と 100 mm は周囲より振動エネルギーが高い場所があり、かつ高い値を示す箇所が密集し丸く見える。一方、埋設物の深さが 150 mm は先に述べたような傾向が確認出来ないため、埋設物の有無の判定は難しいと考えられる。次に、埋設深さ毎の振動エネルギーを比較したグラフを図 3.2.3.18 に示す。

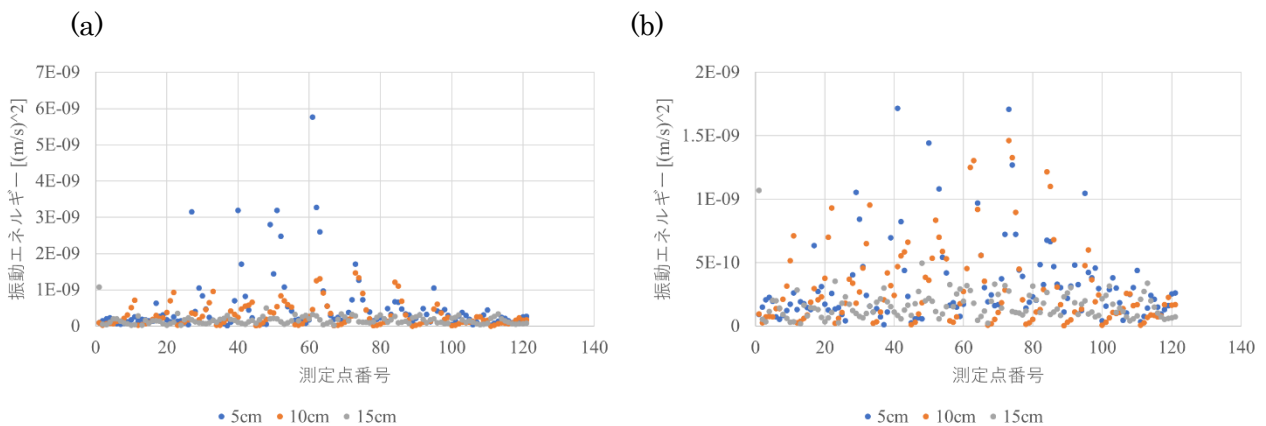


図 3.2.3.18 振動エネルギー比較 (a)全体、(b)拡大



図 3.2.3.18 より、埋設物上ではない測定点の振動エネルギーの値が約  $5e-10$  (m/s)<sup>2</sup> 以下に集中している事が確認出来る。埋設深さ 50 mm, 100 mm では  $5e-10$  (m/s)<sup>2</sup> 以上の値を示す測定点が多数あることから、検出が出来る可能性はあると思われる。次に、図 3.2.3.17 の埋設深さ毎の振動エネルギー分布のカラースケールの最大最小値を同じ値にした結果を図 3.2.3.19 に示す。

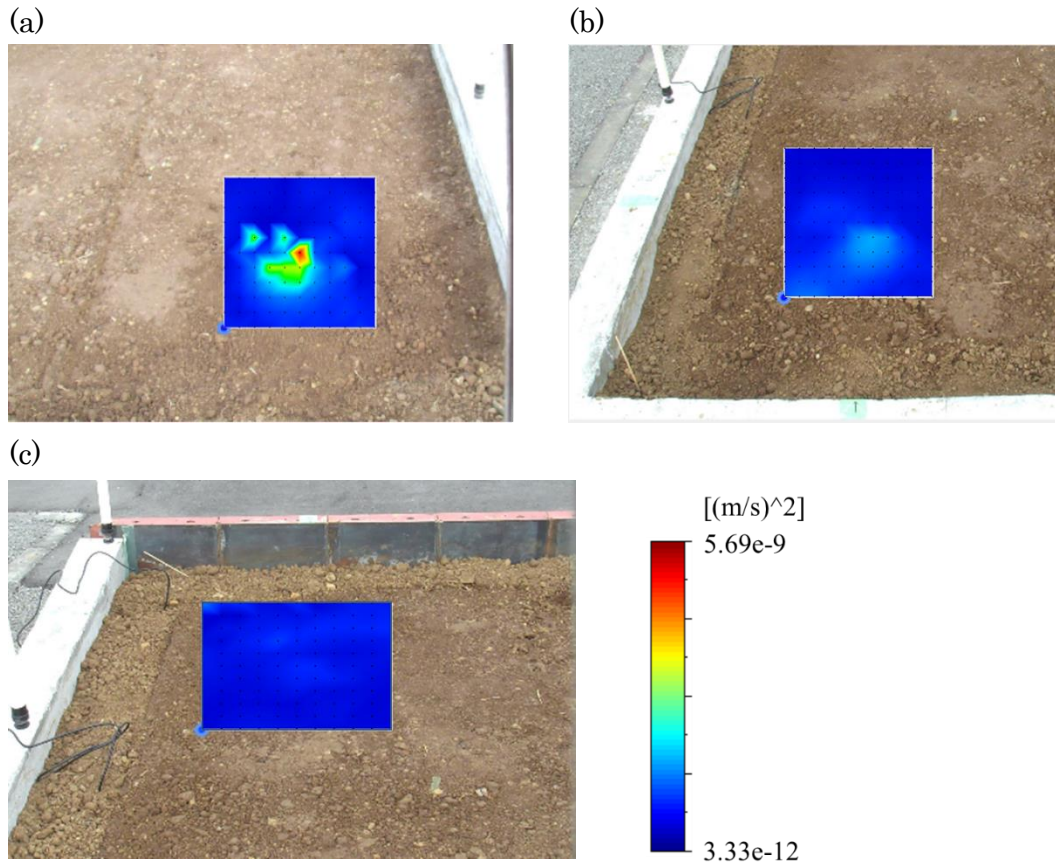


図 3.2.3.19 振動エネルギー分布 (カラースケール統一後)  
(a)埋設深さ 50 mm、(b) 埋設深さ 100 mm、(c) 埋設深さ 150 mm

図 3.2.3.19 より、埋設深さ 50 mm は明瞭に値が高い場所が確認出来るが、埋設深 100 mm と埋設深さ 150 mm は明瞭ではない。ただし、上記の図 3.2.3.18 の結果もあるので、埋設物が無い場所に対して値に有意差があるかつ高い値を示す測定点が密集・隣接しているかを考慮する必要があると思われる。

### 3.2.4 赤土の場合

#### 3.2.4.1 厚木の埋設物試験場における基礎実験(180 mm ホーロー容器)

##### (実験セットアップ)

厚木の埋設物試験場において、直径 180 mm のホーロー容器を埋設した場合の実験が行われた(2020年8月17日)。実験風景写真を図 3.2.4.1、ホーロー容器の埋設位置図を図 3.2.4.2 に示す。実験では計測時間短縮のため、一方向からの計測であったため対象の埋設物により計測距離に差異が存在する。実験時のセットアップ図を図 3.2.4.3 および図 3.2.4.4 に示す。加振用音源である平面音源は両端を脚立で支えられた角材の上に固定し、振動計測用のレーザヘッドは斜めからの計測が行われた。

加振用波形としては、周波数範囲 100-600 Hz のマルチトーンバースト波および 50-200 Hz のシングルトーンバースト波を使用した。波形の周波数範囲を変えた理由については後述するが、実験の結果、100 Hz 前後に埋設物の反応が確認されたため周波数範囲を縮小した。また、実験では埋設深度による影響についても検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。

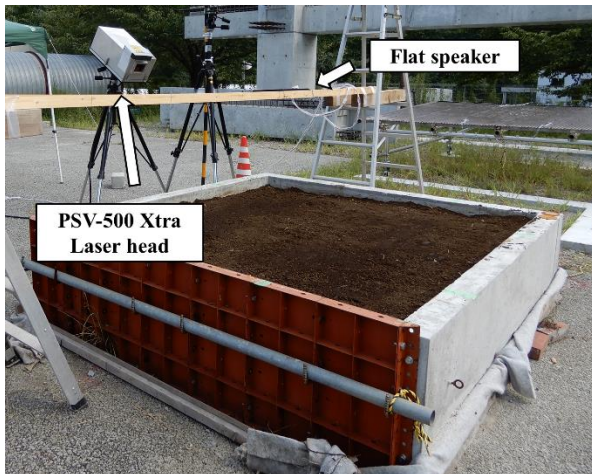


図 3.2.4.1 実験風景写真

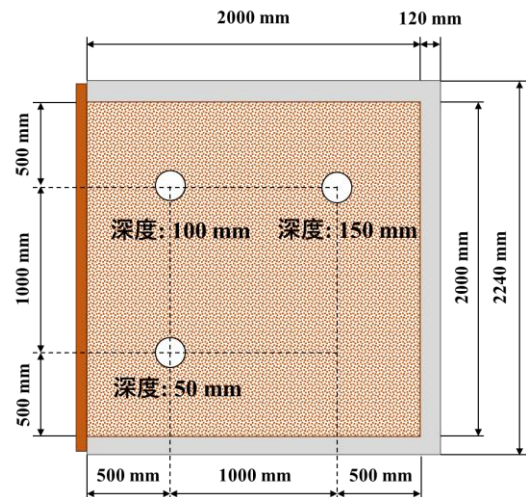


図 3.2.4.2 埋設位置イメージ図

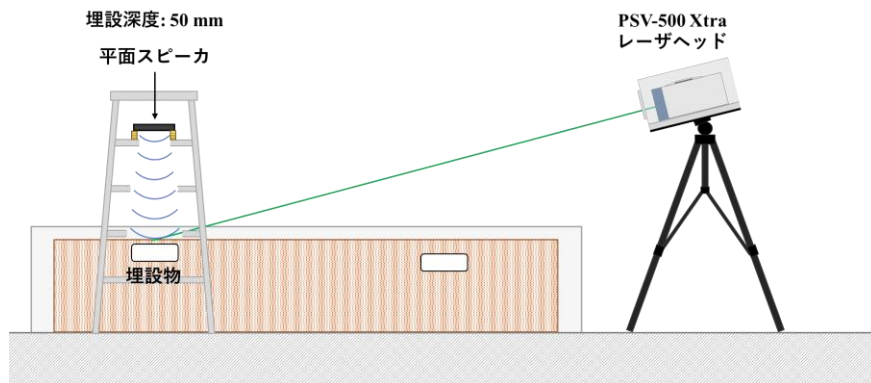


図 3.2.4.3 実験セットアップ図：埋設深度 50 mm

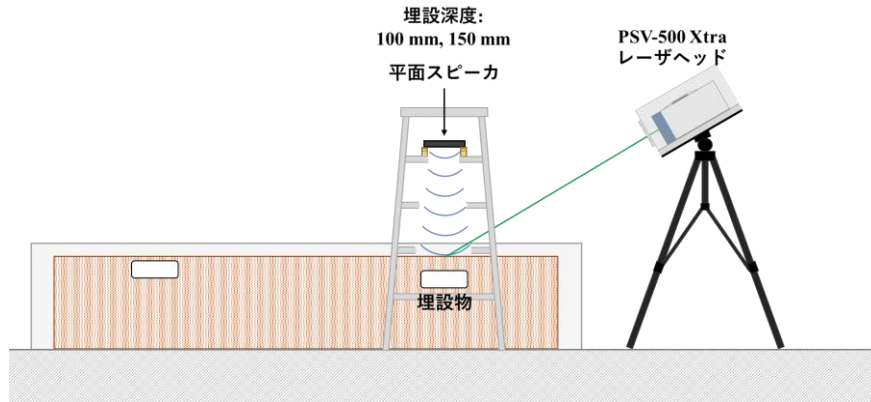


図 3.2.4.4 実験セットアップ図：埋設深度 100 mm, 150 mm

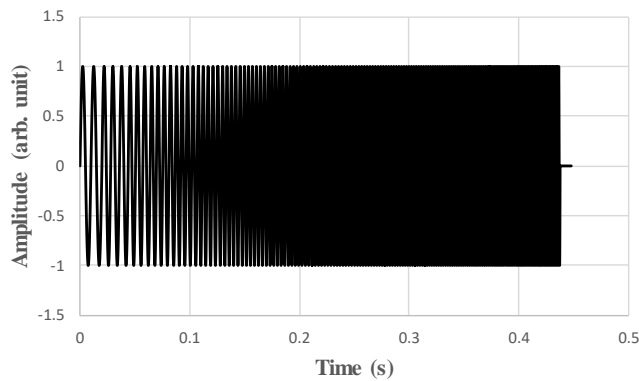
また、100-600 Hz マルチトーンバースト波計測における計測設定を表 3.2.4.1 に示す。

表 3.2.4.1 計測設定：マルチトーンバースト波

マルチトーンバースト波: 100-600 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm
レーザー距離 [m]	2.10	1.76	1.73
音源距離 [m]	0.79	0.79	0.80
加算平均回数	5	5	5
最大音圧 [dB]	103.7	104.3	104.3
計測ポイント数	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11

(加振用波形：100-600 Hz マルチトーンバースト波)

加振用波形であるマルチトーンバースト波を図 3.2.4.5 に示す。周波数範囲は 100-600 Hz、変調周波数は 25 Hz、各周波数のパルス幅は 20 ms、波形の全体時間は 448 ms に設定された。100-600 Hz マルチトーンバースト波計測における計測設定を表 3.2.4.1 に示す。



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

図 3.2.4.5 使用波形：マルチトーンバースト波 100-600 Hz

**(振動エネルギー比分布：100-600 Hz)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.6～図 3.2.4.8 に示す。解析時には周波数フィルター(100-600 Hz)のみを使用した。図中の黒丸は埋設物の大まかな位置を示している。計測範囲としては 500～700 mm 程度に設定されており、埋設物である直径 180 mm のホーロー容器が十分に計測範囲に入る大きさになっている。また、計測密度に関しても 40～60 mm 程度の間隔になっており、埋設物を検出するために必要な間隔に設定された。

埋設深度 50 mm の結果である図 3.2.4.6 では、埋設物の反応が明確に検出されている。埋設深度 100 mm の結果である図 3.2.4.7 では、埋設物上に 1 点反応が検出されているが、上部にも複数反応が存在しており判別は困難な状態である。また、埋設深度 150 mm の結果である図 3.2.4.8 では、大きな反応の塊が存在しているが、想定位置と多少のずれが有り判断が難しい。

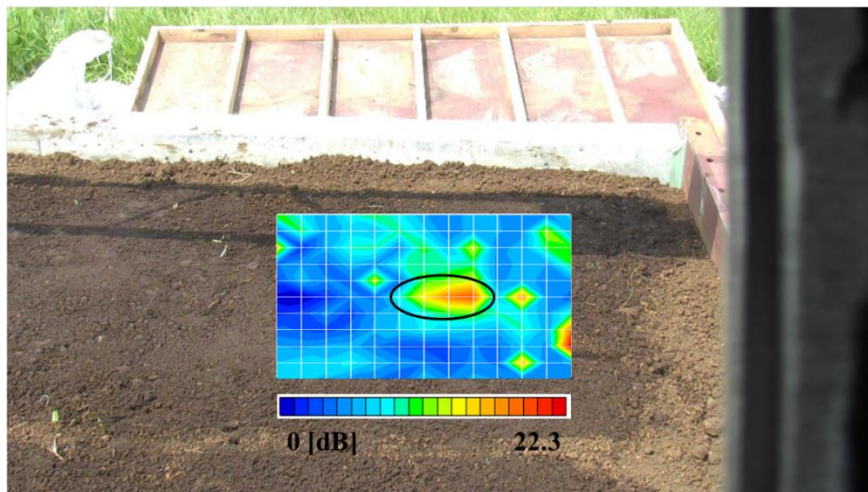


図 3.2.4.6 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布：100-600 Hz、深度 50 mm

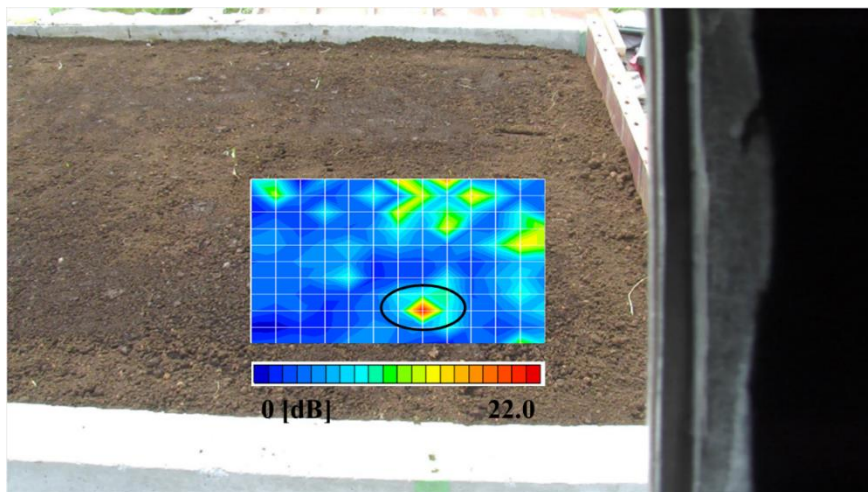


図 3.2.4.7 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布：100-600 Hz、深度 100 mm

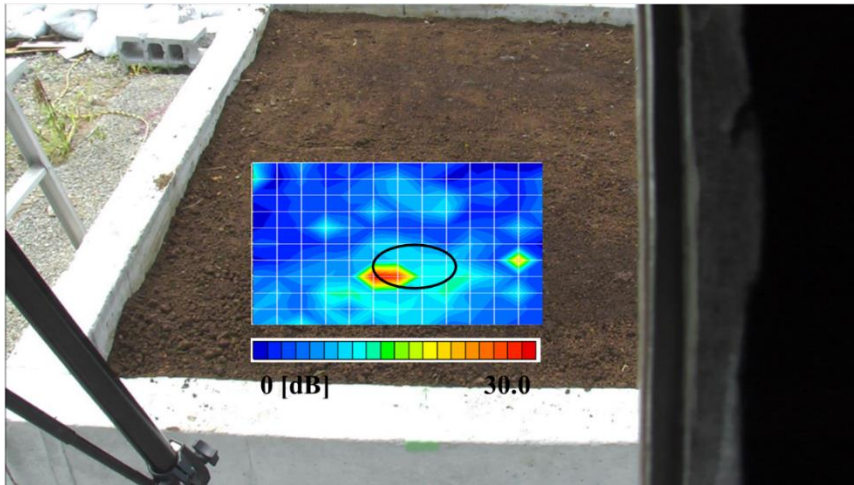


図 3.2.4.8 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布：100-600 Hz、深度 150 mm

#### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物中心付近の振動速度波形を図 3.2.4.9、振動速度スペクトルを図 3.2.4.10 に示す。振動速度波形においては 0.1 秒前後および 0.4 秒前後に埋設深度に反比例する形で、振幅が減少していることが確認できる。これは埋設物直上における土量の増加による影響である。振動速度スペクトルにおいては、100 Hz 前後および 600 Hz 前後に埋設深度と振幅に関連性が見られる結果が得られた。スペクトル上ではいくつかの卓越した反応が検出されたため、埋設深度 50 mm における代表的な周波数の反応を図中に示す。

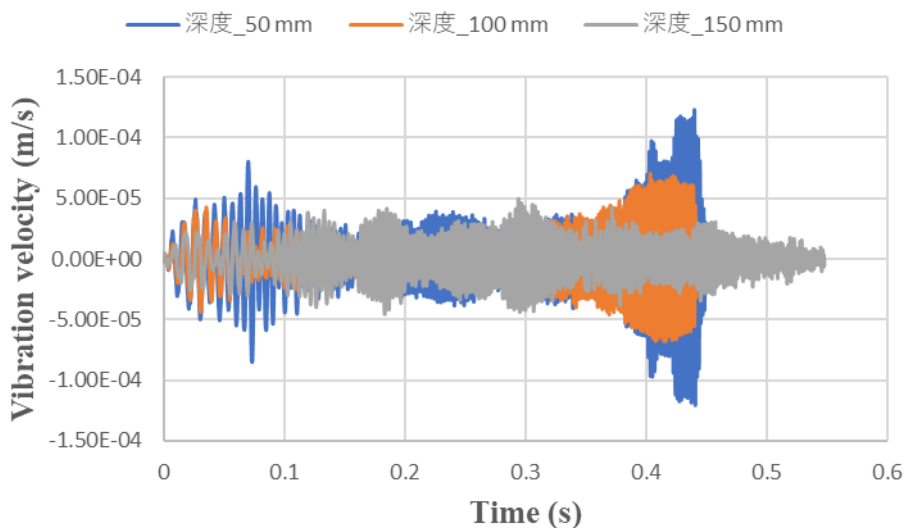


図 3.2.4.9 振動速度波形：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

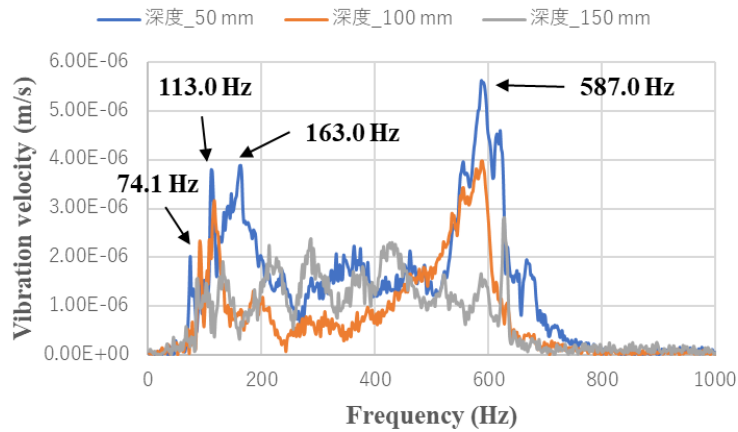
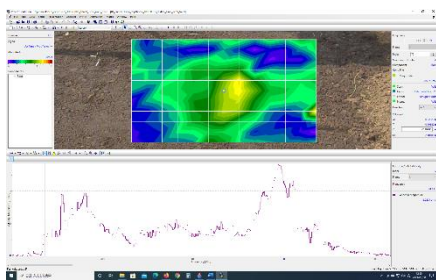


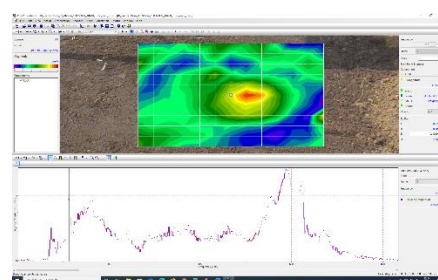
図 3.2.4.10 振動速度スペクトル：埋設深度別、180 mm ホーロー容器、埋設深度 50 mm における卓越した周波数

前述した代表的な周波数における埋設深度 50 mm の振動速度分布を図 3.2.4.11 に示す。図中の上が各周波数における振動速度分布であり、下が全計測点(143 点)における中心点 (Data\_72)の振動速度スペクトルである。74.1Hz、113.0 Hz、163.0 Hz、587.0 Hz 全てで埋設物の反応が確認できる。その中で、特に 113.0 Hz の結果において埋設物の形状が推測できるほどに明確な反応が確認されており、この周波数が 180 mm ホーロー容器を検出するのに適した周波数であると考えられる。そこで、次に 74.1 Hz および 163.0 Hz を含んだ周波数範囲 50-200 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行った。

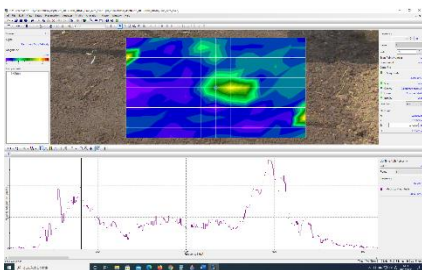
(a) 74.1 Hz



(b) 113.0 Hz



(c) 163.0 Hz



(d) 587.0 Hz

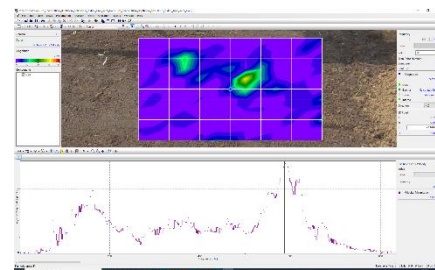
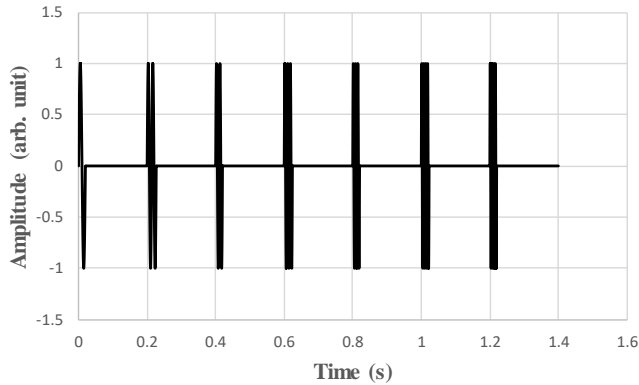


図 3.2.4.11 振動速度分布およびスペクトル：埋設深度 50 mm、Data\_72 (中心点)

(a) 74.1 Hz (b) 113.0 Hz (c) 163.0 Hz (d) 587.0 Hz

**(加振用波形：50-200 Hz シングルトーンバースト波)**

加振用波形であるシングルトーンバースト波を図 3.2.4.12 に示す。周波数範囲は 50-200 Hz、変調周波数は 25 Hz、各周波数のパルス幅は 20 ms、インターバルタイムは 200 ms、波形の全体時間は 1400 ms に設定された波形である。



周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.2.4.12 使用波形：シングルトーンバースト波 50-200 Hz

**(振動エネルギー比分布：50 -200 Hz)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.13～図 3.2.4.16 に示す。解析時には周波数フィルター(50-200 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm の結果では、埋設物の反応が明確に検出された。また、埋設深度 100 mm の結果では、周囲にも反応が存在するが埋設物の反応も検出されている。しかし、埋設深度 150 mm の結果では埋設物上に 1 点しか反応が存在せず、埋設物の判別が困難であると考えられる。埋設物無しの結果では、埋設物が存在しないにも関わらず右側に大きな反応が検出された。これは土壌の状態や風による計測用レーザの振動が原因で、ノイズとしてこのように検出されたと考えられる。

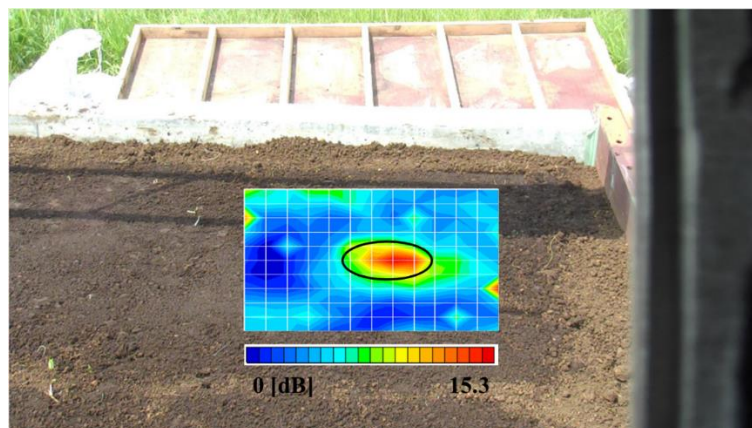


図 3.2.4.13 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,50-200 Hz,埋設深度 50mm

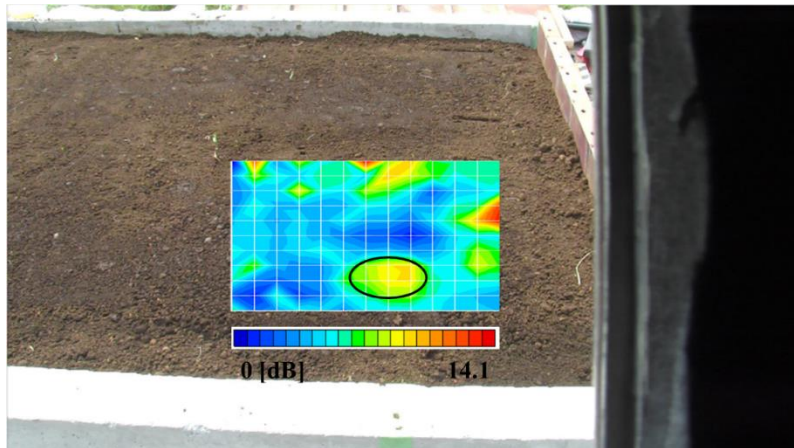


図 3.2.4.14 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,50-200 Hz,埋設深度 100 mm

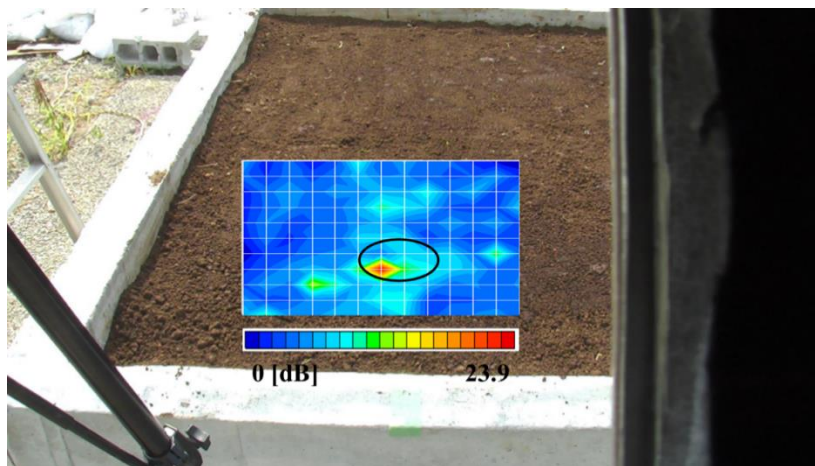


図 3.2.4.15 180mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,50-200 Hz,埋設深度 150 mm

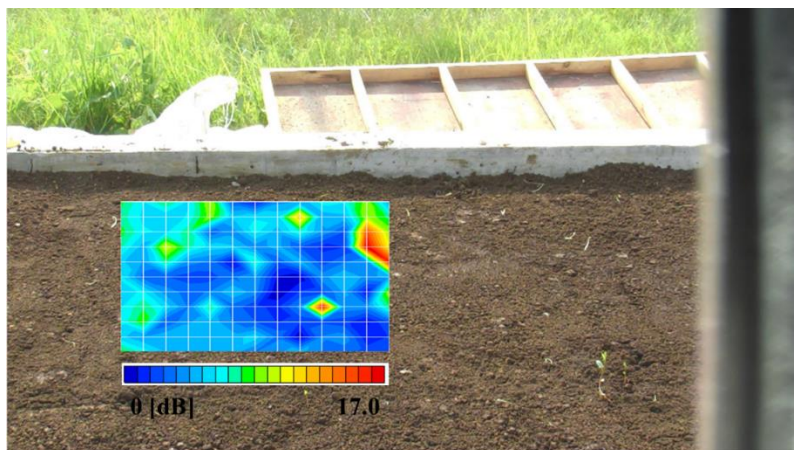


図 3.2.4.16 埋設物が無い場合の振動エネルギー比分布,50-200 Hz



### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物中心付近の振動速度波形を図 3.2.4.17、拡大した波形を図 3.2.4.18 に示す。また同計測点の振動速度スペクトルを図 3.2.4.19 に示す。これらのデータは加振周波数の領域外をカットするため 50-200 Hz のバンドパスフィルタがかけられている。

振動速度波形においては埋設深度に反比例する形で、振幅が減少していることが確認できる。これは埋設物直上における土量の増加による影響である。埋設物無しが一番小さくなる理由は土量が最大になるためであると考えられる。

振動速度スペクトルにおいても、周波数のずれはあるが埋設深度と振幅に反比例の関係が見られた。これらの結果においても、卓越した反応がいくつか検出されたため、埋設深度 50 mm を例に代表的なものを図中に矢印で示す。

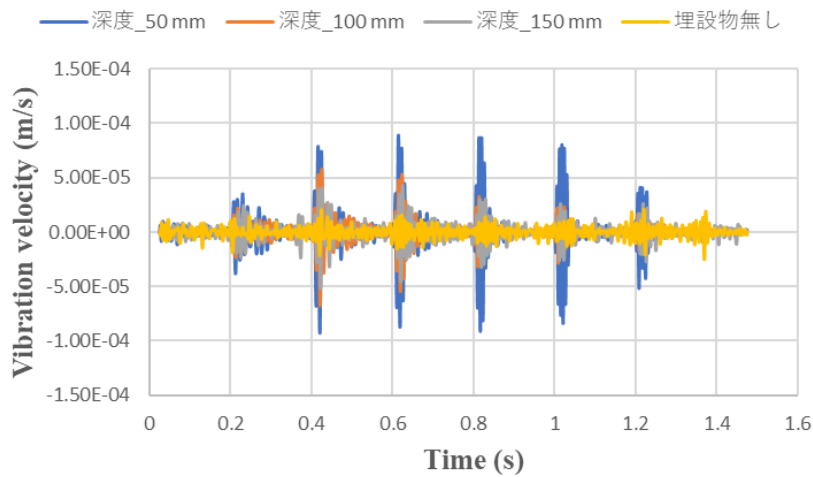


図 3.2.4.17 振動速度波形：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

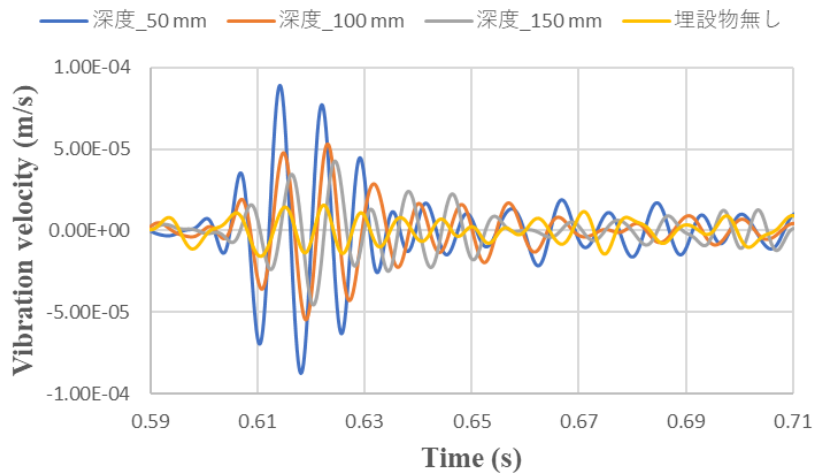


図 3.2.4.18 振動速度波形拡大：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

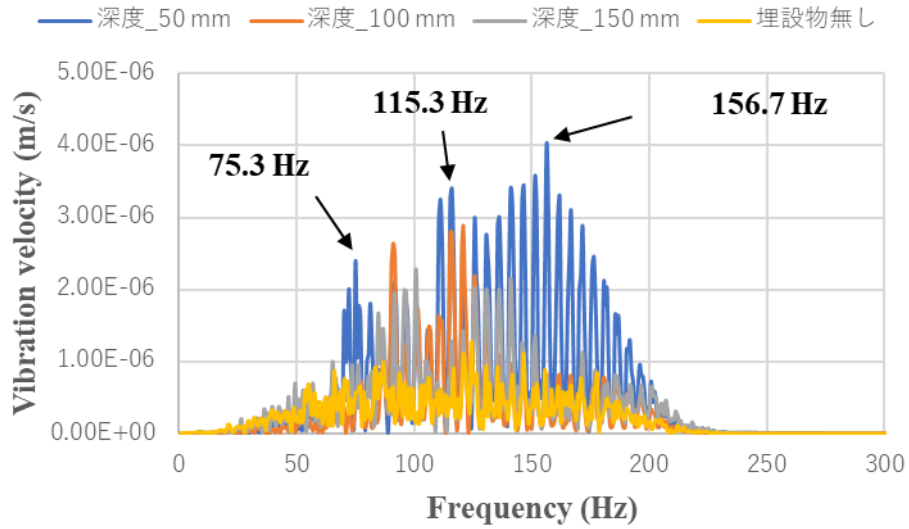
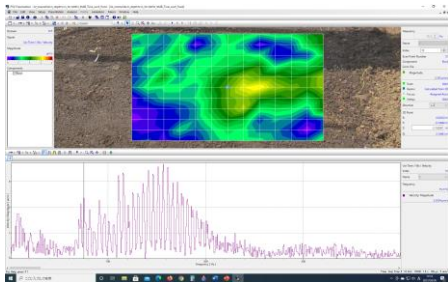


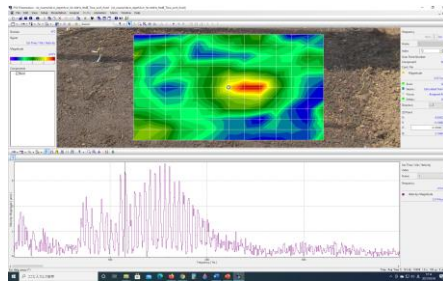
図 3.2.4.19 振動速度スペクトル：埋設深度別、180 mm ホーロー容器

前述した代表的な周波数における埋設深度 50 mm の振動速度分布を図 3.2.4.20 に示す。図中の上が各周波数における振動速度分布であり、下が全計測点(143 点)における中心点 (Data\_72)の振動速度スペクトルである。下記における 115.3 Hz の結果において、特に強く埋設物の反応が検出されていることが分かる。

(a) 75.3 Hz



(b) 115.3 Hz



(a) 156.7 Hz

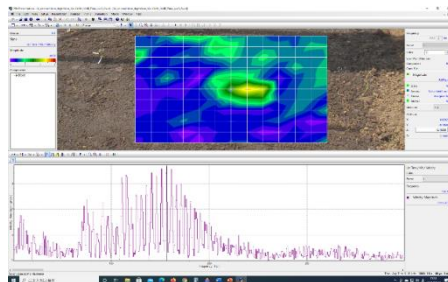


図 3.2.4.20 振動速度分布およびスペクトル：埋設深度 50 mm、Data\_72 (中心点)

(a) 75.3 Hz (b) 115.3 Hz (c) 156.7 Hz

## (積分範囲を狭めた場合)

前述した結果を受けて、100-600 Hz から 50-200 Hz に絞り込んだ周波数範囲をさらに絞り込み、100-140 Hz で計算した振動エネルギー比分布で比較を行った。図 3.2.4.21 は埋設深度 50 mm、Fig. 3.2.4.22 は埋設深度 100 mm、3.2.4.23 は埋設深度 150 mm における、100-600 Hz マルチトーンバースト波および 50-200 Hz シングルトーンバースト波で計測した結果である。図 3.2.4.21 では、周波数範囲を絞り込む前から確認できていたため変化が少ないが、より明瞭に埋設物の反応が見ることができる。特に効果が大いなのは図 3.2.4.22 における埋設深度 100 mm の結果である。周波数を絞り込んだことで、簡易に判別可能な程に埋設物の反応が発現している。



図 3.2.4.21 振動エネルギー比分布：100-140 Hz、埋設深度 50 mm

(a) 100-600 Hz マルチトーンバースト波 (b) 50-200 Hz シングルトーンバースト波



図 3.2.4.22 振動エネルギー比分布：100-140 Hz、埋設深度 100 mm

(a) 100-600 Hz マルチトーンバースト波 (b) 50-200 Hz シングルトーンバースト波

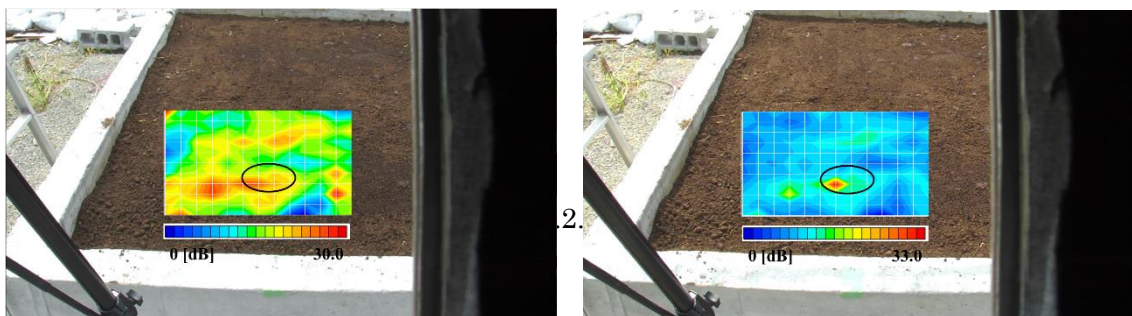


図 3.2.4.23 振動エネルギー比分布：100-140 Hz、埋設深度 150 mm

(a) 100-600 Hz マルチトーンバースト波 (b) 50-200 Hz シングルトーンバースト波

### 3.2.4.2 厚木の埋設物試験場における基礎実験(100 mm ホーロー容器)

#### (実験セットアップ)

厚木の埋設物試験場において、直径 100 mm のホーロー容器を埋設した場合の実験が行われた(2020年8月12日)。実験風景写真を図 3.2.4.24、ホーロー容器の埋設位置を図 3.2.4.25 に示す。実験時のセットアップは前節の 180mm ホーロー容器を用いた実験と同じである。加振用波形としては、周波数範囲 100-600 Hz のマルチトーンバースト波を使用した(前節と同じ)。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 20, 50, 100 mm と変化させた。計測時の設定について表 3.2.4.2 に示す。

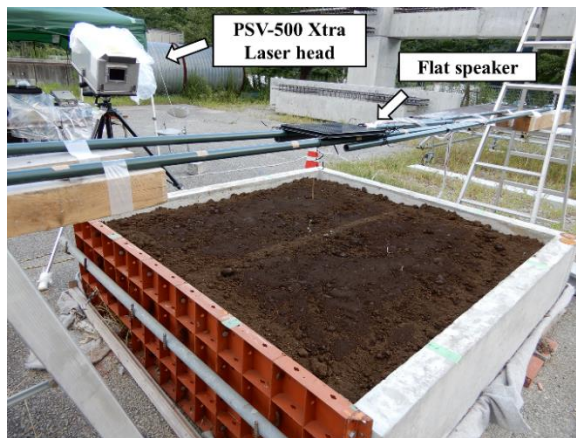


図 3.2.4.24 実験風景写真

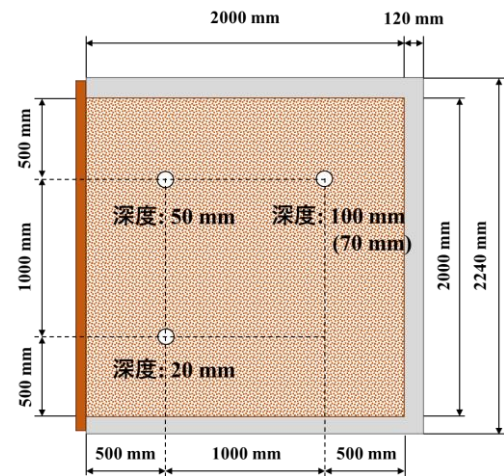


図 3.2.4.25 埋設位置イメージ図

表 3.2.4.2 計測設定

	埋設深度: 20 mm	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm
レーザ距離 [m]	2.10	1.67	1.66
音源距離 [m]	0.75	0.74	0.75
加算平均回数	5	5	5
最大音圧 [dB]	104.1	104.1	102.7
計測ポイント数	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11	143 = h13 * v11

#### (振動エネルギー比分布 : 100-600 Hz)

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.26～図 3.2.4.28 に示す。解析時には周波数フィルタのみを使用した。埋設深度 20 mm および 50 mm では、埋設物の反応が検出された。しかし、埋設深度 100 mm の結果では周囲にノイズが多数検出されており、埋設物の反応を判別困難な状態である。

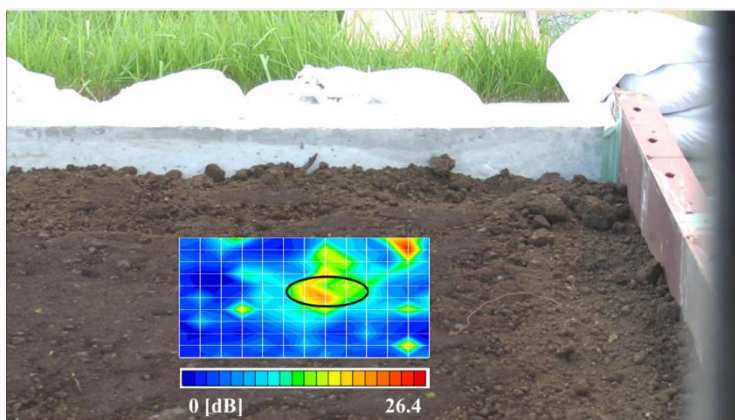


図 3.2.4.26 100mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,100-600 Hz,埋設深度 20 mm

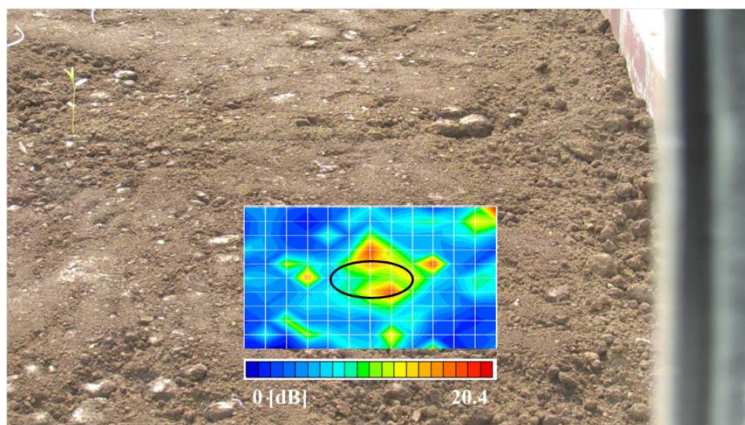


図 3.2.4.27 100mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,100-600 Hz,埋設深度 50 mm

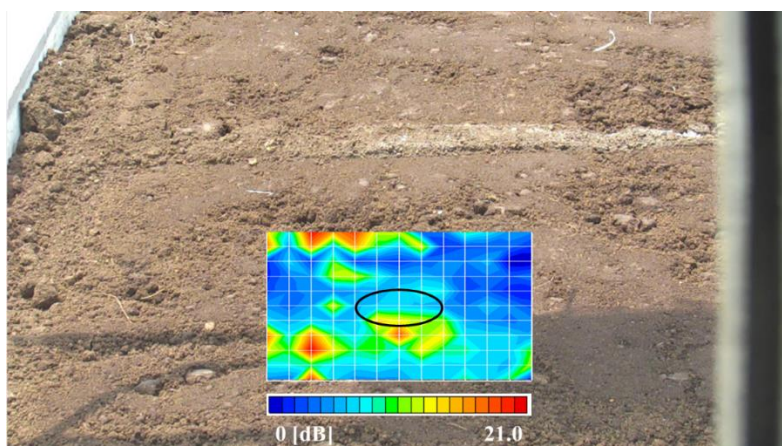


図 3.2.4.28 100mm ホーロー容器の振動エネルギー比分布,100-600 Hz,埋設深度 100 mm

### (振動波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物中心付近の振動速度波形を図 3.2.4.29、振動速度スペクトルを図 3.2.4.30 に示す。埋設物に反比例する形で、振幅が減少していることが確認できる。これは埋設物直上における土量の増加による影響であると推測される。しかし、今回の振動速度スペクトルにおける、埋設深度による明確な周波数の変化等は確認が困難である。原因として、埋設物と思われる反応が広い帯域で確認されており、周波数の変化が特定しづらいことが挙げられる。

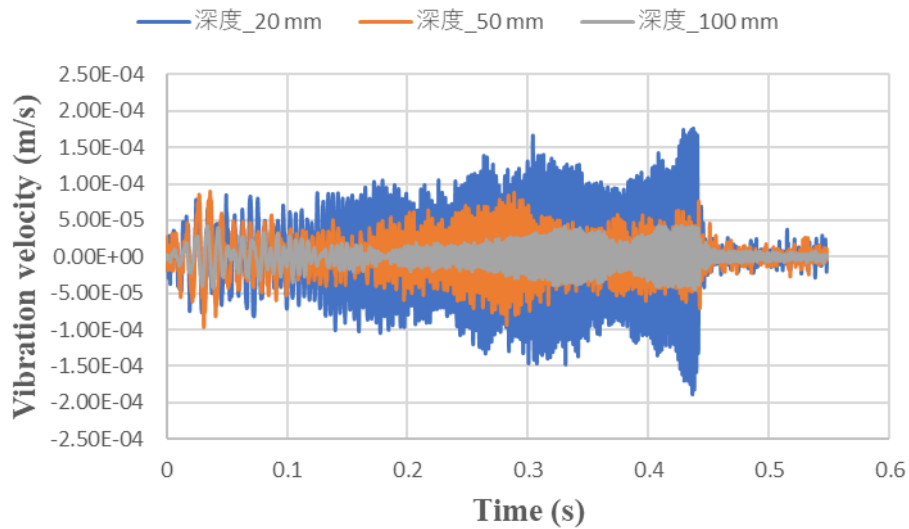


図 3.2.4.29 振動速度波形：埋設深度別

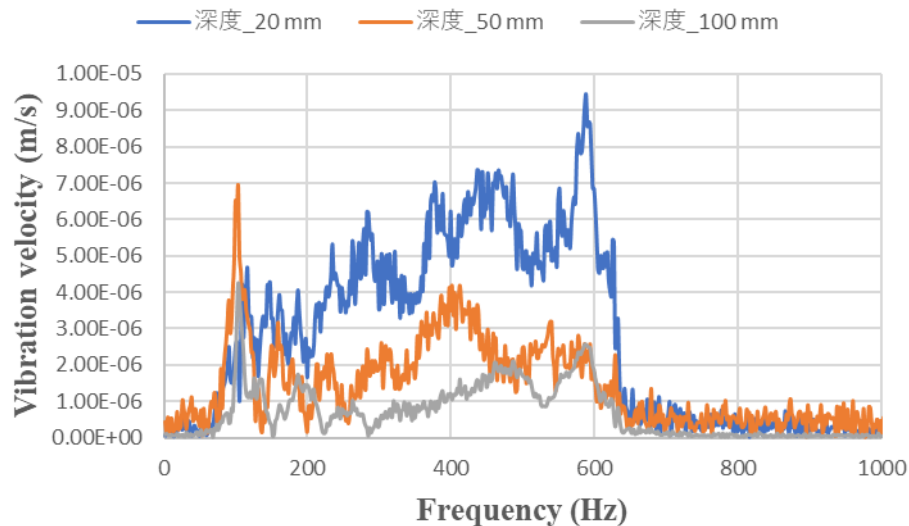


図 3.2.4.30 振動速度スペクトル：埋設深度別

### 3.2.4.3 つくばの埋設物試験場 2 における基礎実験

#### (実験セットアップ)

赤土に埋設された直径 300 mm のポールベースにおいて、埋設深度を変化させた影響について検討を行った。実験風景写真を図 3.2.4.31、ポールベースの埋設位置イメージ図を図 3.2.4.32 に示す。実験では埋設深度による影響について検証するため、埋設深度を 50 mm、100 mm、150 mm と変化させた。図中における括弧内の数値は、計測後に調べた実測値である。実験では計測時間短縮のため、一方向からの計測であったため対象の埋設物により計測距離に差異が存在する。実験時のセットアップを図 3.2.4.33 および図 3.2.4.34 に示す。加振用音源である平面音源はイレクターパイプにより組まれた台の上に固定し、振動計測用のレーザヘッドは供試体の傍らに配置し斜めからの計測が行われた。加振用波形としては、周波数範囲 50-152 Hz のシングルトーンバースト波を使用した。使用波形および波形設定を図 3.2.4.35 に示す。埋設深度別の計測時の設定について表 3.2.4.3 に示す。

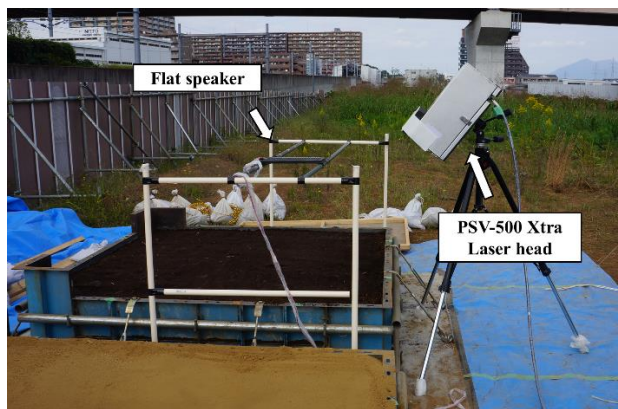


図 3.2.4.31 実験風景写真

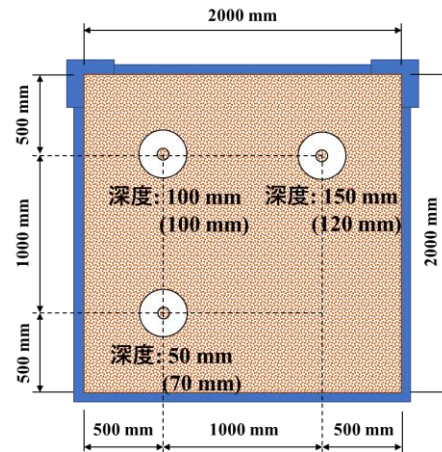


図 3.2.4.32 埋設位置イメージ図

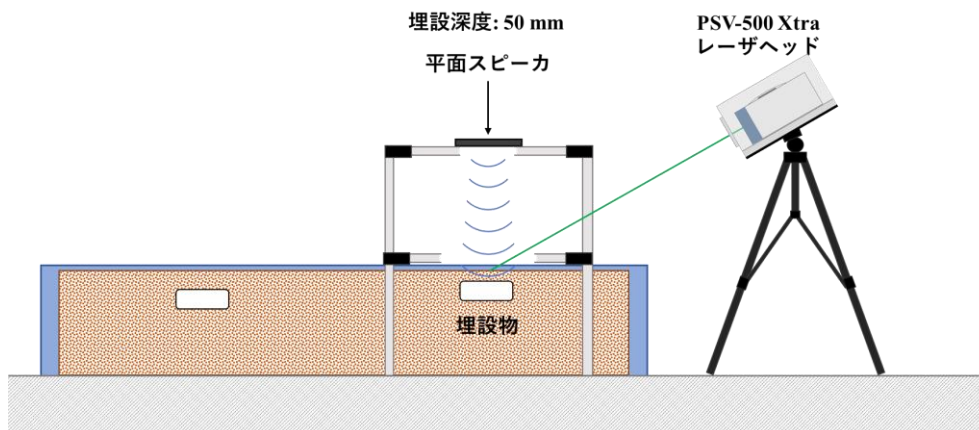


図 3.2.4.33 実験セットアップ図：埋設深度 50 mm

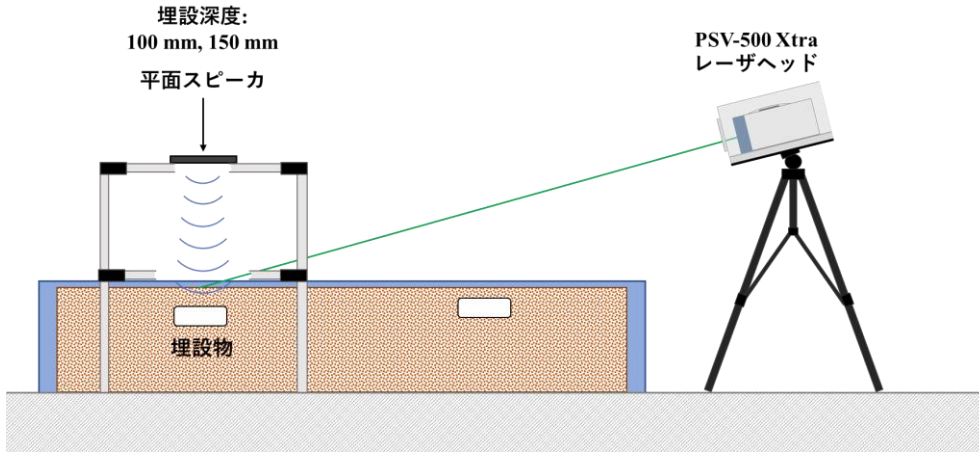
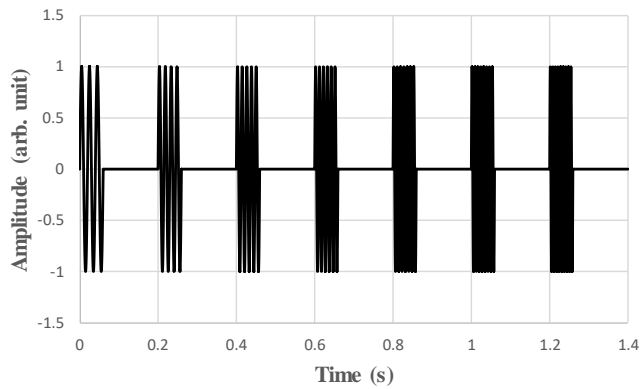


図 3.2.4.34 実験セットアップ図：埋設深度 100 mm, 150 mm



周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.2.4.35 使用波形：シングルトーンバースト波 50-152 Hz

表 3.2.4.3 計測設定

シングルトーンバースト波: 50-152 Hz	埋設深度: 50 mm	埋設深度: 100 mm	埋設深度: 150 mm	埋設物無し
レーザ距離 [m]	1.02	1.86	1.97	1.09
音源距離 [m]	0.71	0.71	0.71	0.70
加算平均回数	5	5	5	5
最大音圧 [dB]	99.0	99.0	99.0	99.0
計測ポイント数	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9	99 = h11 * v9



**(振動エネルギー比分布 : 50-152 Hz)**

検出された結果の振動エネルギー比分布を図 3.2.4.36～図 3.2.4.39 に示す。解析時には周波数フィルター(50-152 Hz)のみを使用した。埋設深度 50 mm では明確に埋設物が検出されている。100 mm の結果では埋設物上に反応があるが周囲にも同等の反応が存在しており判別が難しい。150 mm の結果でも埋設物状に反応が確認できるが、周囲により強い箇所が存在している。埋設物無しに至っては、大きな反応の塊が複数存在している。これらは、前述したように土の状態が大きく影響していると考えられる。

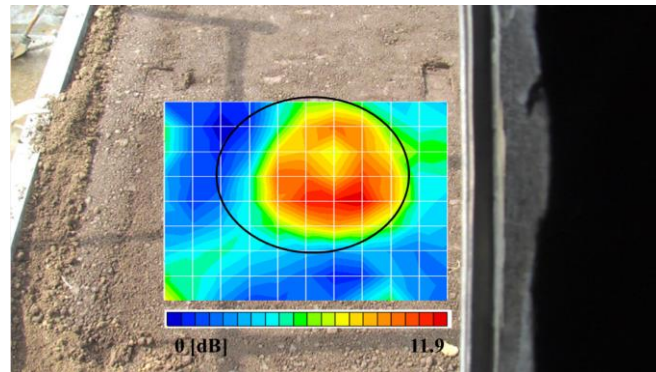


図 3.2.4.36 300mm ポールベースの振動エネルギー比分布,50-152 Hz,埋設深度 50 mm

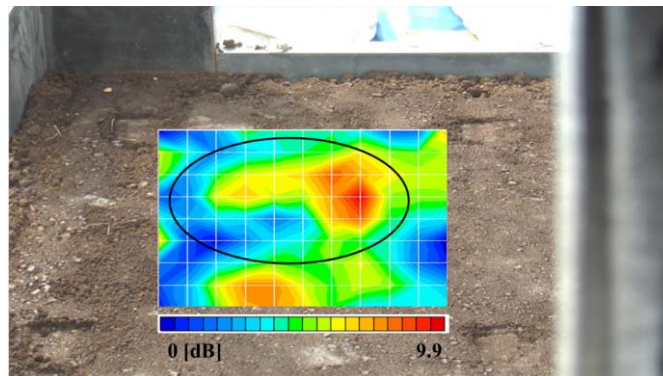


図 3.2.4.37 300mm ポールベースの振動エネルギー比分布,50-152 Hz,埋設深度 100 mm

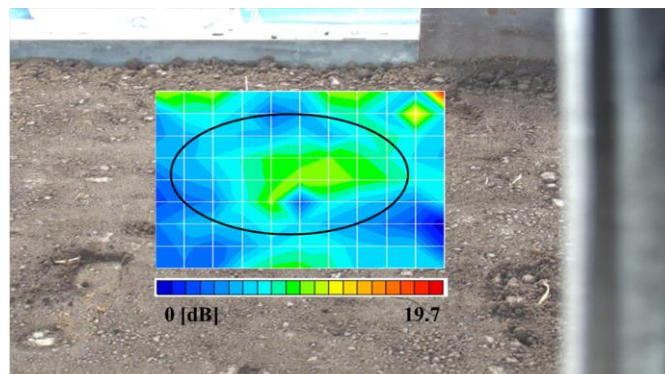


図 3.2.4.38 300mm ポールベースの振動エネルギー比分布,50-152 Hz,埋設深度 150 mm

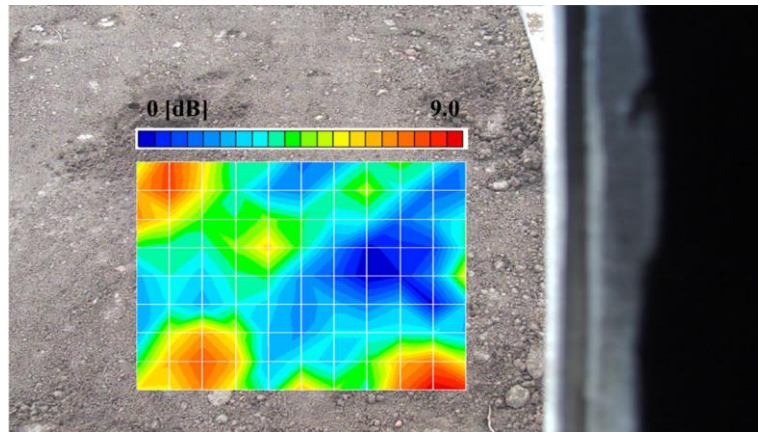


図 3.2.4.39 埋設物無しの場合の振動エネルギー比分布,50-152 Hz

#### (振動速度波形およびスペクトル比較)

検出された結果における埋設物上の代表点における生データの振動速度波形を図 3.2.4.40、振動速度スペクトルを図 3.2.4.41 に示す。埋設深度 150 mm においても、埋設物の反応である 100 Hz 付近のピークが存在しており、この結果では深い位置まで検出できている。

次に計測点(99ポイント)における全点平均の振動速度波形を図 3.2.4.42、振動速度スペクトルを図 3.2.4.43 に示す。埋設物ありのスペクトルでは、埋設物の反応が変わらずに検出されているが、埋設物無しの振動速度が大きく上昇していることが分かる。これは前述した振動エネルギー比の結果にもある通り、広い範囲でノイズが検出されており、全点平均したことでそれらが混在して値が上昇したことが原因である。

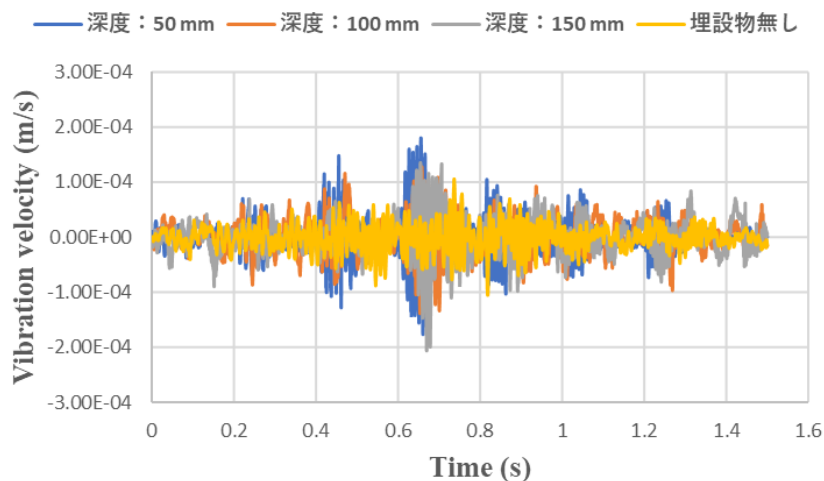


図 3.2.4.40 振動速度波形：代表点、300 mm プラスチックポールベース

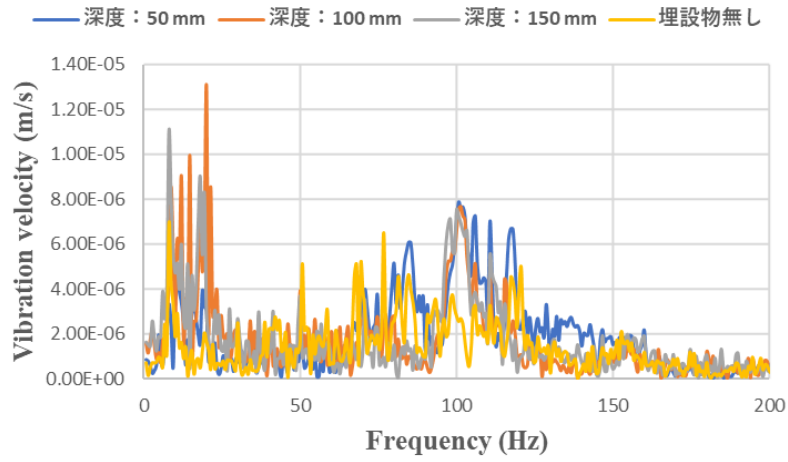


図 3.2.4.41 振動速度スペクトル：代表点、300 mm プラスチックポールベース

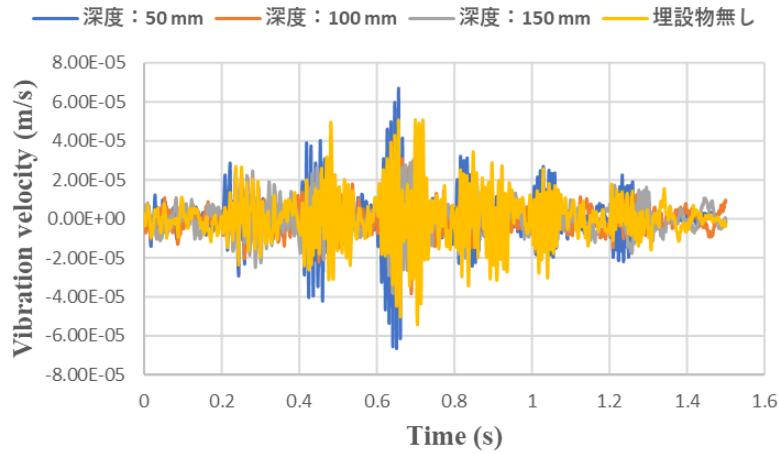


図 3.2.4.42 振動速度波形：全点平均、300 mm プラスチックポールベース

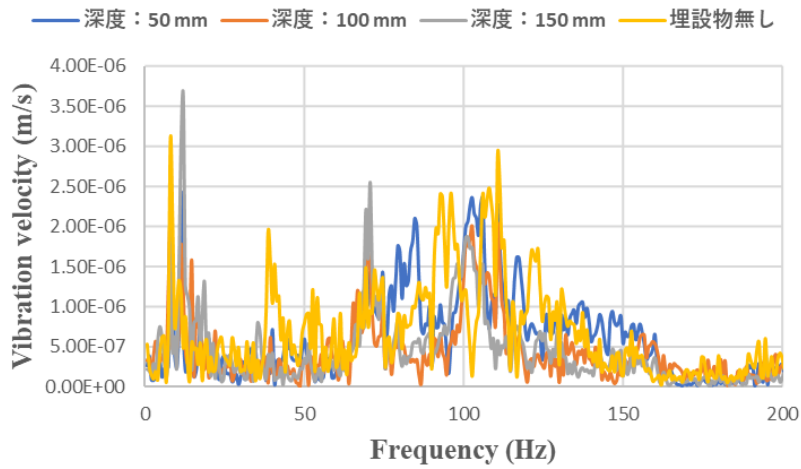


図 3.2.4.43 振動速度スペクトル：全点平均、300 mm プラスチックポールベース

### 3.2.5 まとめ

市販音源(平面音源)を用いた音波照射による地表面振動の計測を、珪砂、関東ローム土、シルト土(つくばの表層土)、赤土(グラウンド土)に対して実施した。最初に珪砂の実験結果から、埋設物を検出する周波数は、埋設物の大きさには反比例するものの、深さを変化させても、あまり変わらないことが明らかになった。そのため、埋設物の深さを細かく変化させて検出周波数がどのように推移するのか実験してみたところ、地表面に近い場所ではたわみ共振に近い周波数で振動するものの、深くなるにつれて減少し、およそ深さ 20 mm 以降はほぼ一定となることが確認された。これは埋設状態における埋設物自体の振動が地表面で観測されていることを意味していると思われる。

つづいて、関東ローム土、シルト土や赤土などを用いた実験を実施した。様々な種類の土壌を用いた実験結果(表 3.2.5.1 参照)から、土壌の種類や状態(含水率や締固度)および音圧にも依存すると思われるが、検出可能な埋設物(中空円形容器の場合)の深さは、直径 300 mm のプラポールベースで約 100~150 mm、直径 180 mm のホーロー容器で約 100 mm および直径 100 mm のホーロー容器で約 50 mm 程度であることが明らかになった。これは、探査可能な深度は、埋設物の直径のおよそ半分程度であることを意味している。

表 3.2.5.1 探査可能な埋設物の深さと大きさ(直径)

		直径 [mm]		
		100	180	300
深さ [mm]	150	○	×××	○△×
	100	○×	○○×	○○○
	50	○△○	○○○	○○○
	20	○		

○珪砂    ○シルト    ○赤土    ○関東ローム

また、関東ローム土を用いた実験では、遠距離からの計測を試み、LDV から埋設物までの距離が約 20 m であっても検出可能であることが明らかになった。ただし、この結果はレーザーヘッドの高さは約 2 m 時の結果であり、使用した LDV (赤外線レーザー 1550 nm, 10 mW) の性能を考えると、仮にレーザーヘッドの高さを約 10 m に設定できれば、土表面へのレーザーの入射角度は 20 m 時と変わらないため、100 m の離隔であっても、20 m 離隔時と同様に検出可能であると思われる。この理由は、距離が増えて、レーザー光の照射面積が増えても、その照射範囲内で最も強い反射光を放つ部分の信号が有効となるため、地表面への入射角が同じであれば、ドップラ効果により計測される振動速度自体には影響がないためである。

なお、今回の研究では、音源自体を UAV に搭載することを想定していたため、主に積載可能重量(ペイロード)の観点から、比較的軽量の平面音源(2.2 kg)を用いた検討を行った。これは UAV に音源を搭載することにより、自在に音源位置を変化させられるメリットの方が大きいと判断したためである。一方で、今回の地中埋設物の検出周波数は、おおよそ 300 Hz 以下と低周波であったため、本来は大型のウーファーを音源として用いるのが音響

学的には望ましい。しかしながら、大型ウーファーとなると重量が重くなりすぎることで、および強力な永久磁石による磁場が UAV の飛行制御に影響を与える可能性が考えられたために、大型ウーファーを用いた検討については実施しなかった。

### 3.3 照射音波波形の最適化による計測速度の改善

#### 3.3.1 計測速度の改善

照射音波の波形は、1 回の照射で 1 つの周波数を使用するシングルトーンバースト波、1 回の照射で複数の周波数を使用するマルチトーンバースト波を非接触音響探査法では考案使用して来た。前節の結果から、直径 100~300 mm 程度の大きさのプラスチック製容器を探査用の埋設物として用いた場合には、探査用の加振波形として、1 kHz 以下、実際には 200~300 Hz 付近以下の周波数帯があれば十分であることが判明している。そのため、比較的狭い範囲の周波数帯域をカバーする波形が良いが、その分、地中内の埋設物を振動させるためにパルス持続時間は長めにとる必要がある。実験で使用したシングルトーンバースト波およびマルチトーンバースト波の例を図 3.3.1.1 に示す。

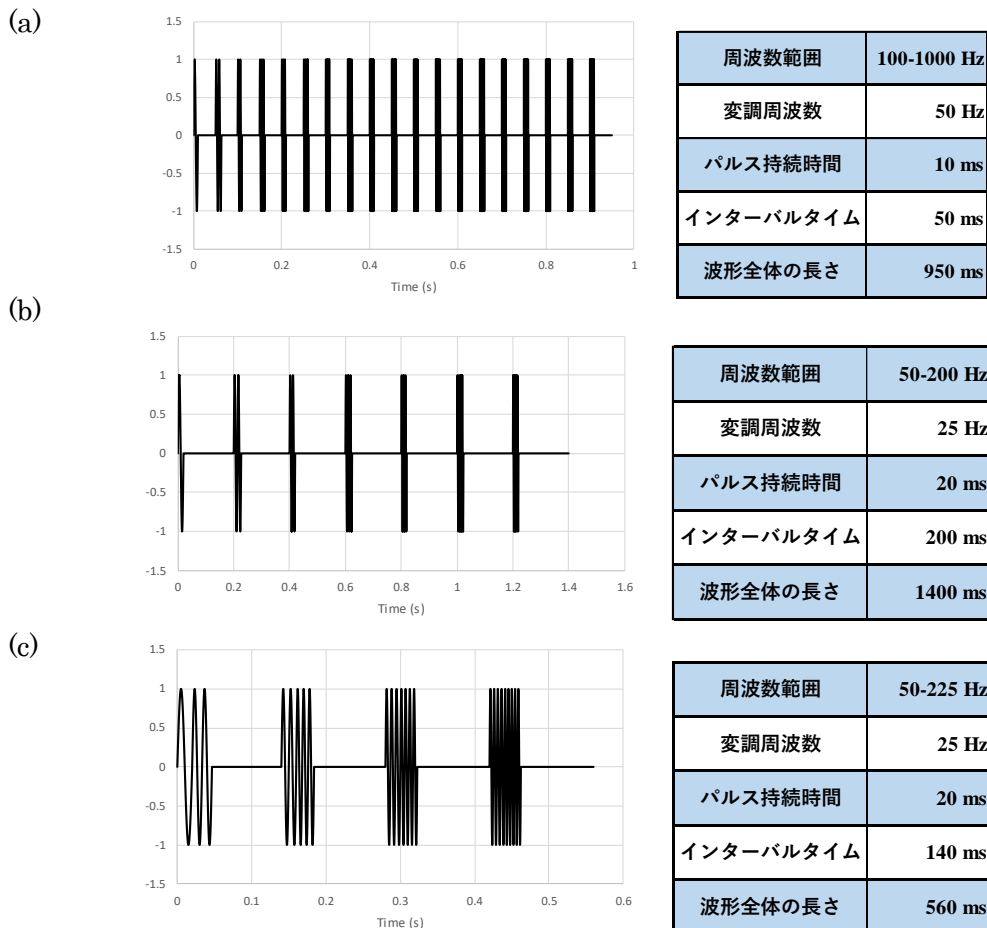
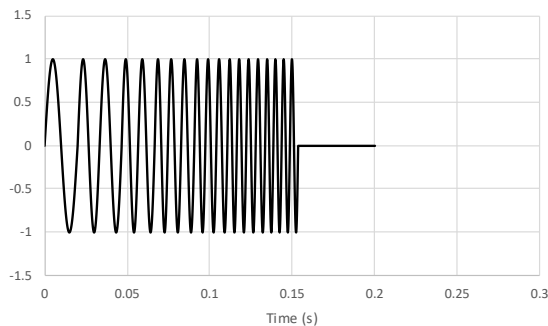


図 3.3.1.1 加振用音波波形例(1)、 (a) シングルトーンバースト波 : 100-1000 Hz, (b) シングルトーンバースト波 : 50-200 Hz, (c) マルチトーンバースト波 : 50-225 Hz

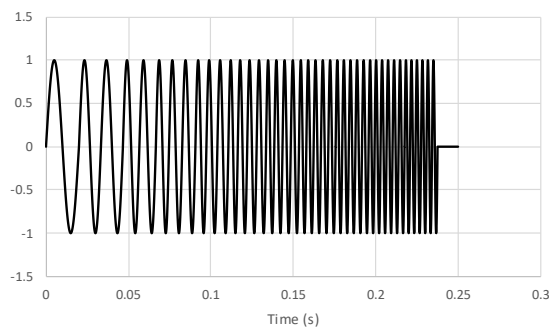
マルチトーンバースト波を使用すれば、シングルトーンバースト波よりも高速な計測が可能になるが、LDV の位置が音源から離れた場合には、反射波による LDV への影響 (LDV ヘッド自体の共振現象) を考慮する必要はなくなるため、バースト波群間のインターバル時間は無くしてしまっても良いことになる。そのため、マルチトーンバースト波のインターバル時間を無くした波形を考案した。波形例を図 3.3.1.2 に示す。このような波形であれば、探査性能 (加振力) を下げることなく、高速な計測が可能である。

(a)



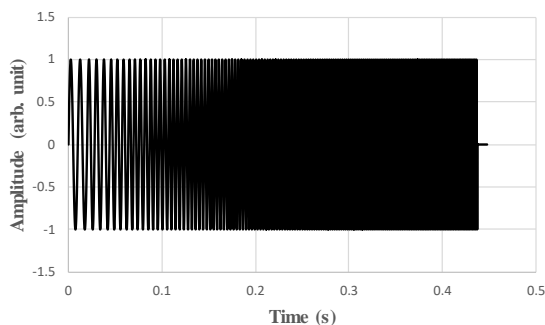
周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	200 ms

(b)



周波数範囲	50-300 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	250 ms
波形全体の長さ	250 ms

(c)



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

図 3.3.1.2 加振用音波波形(2) (a) マルチトーンバースト波 : 50-200 Hz, (b) マルチトーンバースト波 : 50-300 Hz, (c) マルチトーンバースト波 : 100-600 Hz

図 3.3.1.2 に示される加振用音波波形は、高速な計測を実現するために、あえてすべてのバースト波のインターバル時間を取り除いた波形である。一見したところ、チャープ波形に似ているが、実際には加振力を高めるために、各周波数のバースト波のパルス持続時間を長くすることにより、加振力を高める工夫が行われている。

### 3.3.2 埋設物の大きさに応じた周波数と加振力の調整

令和 2 (2020) 年度における非接触音響探査法に用いた、主な使用波形の変遷を表 3.3.2.1 に示す。8/12～13 の実験では直径 100 mm のホーロー容器を対象に実験を行った。使用波形を図 3.3.2.1～図 3.3.2.2 に示す。この時は新たに埋設物を埋め直して対象の共振周波数が不明であるため、100-600 Hz と広めの範囲で加振をして最適な周波数を調査した。その結果 550 Hz 前後に直径 100 mm のホーロー容器の反応が確認されたため、この後は 450-600 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行った。

8/17～18 の実験では直径 180 mm のホーロー容器を対象に実験を行った。使用波形を図 3.3.2.3～図 3.3.2.4 に示す。ここでも、初めに 100-600 Hz の波形を用いて対象の周波数を調査した。その後直径 180 mm のホーロー容器は 100 Hz 辺りに卓越した反応が存在することを確認した。この後は 50-200 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行った。

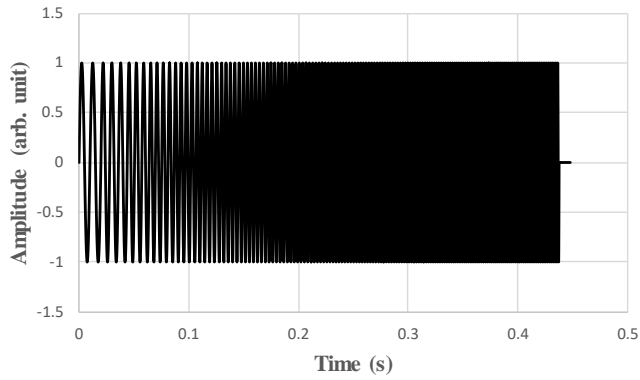
10/12～14 の実験では、直径 300 mm のポールベースを対象に計測を実施した。使用波形を図 3.3.2.5～図 3.3.2.6 に示す。この時はまず初めに 50-200 Hz のシングルトーンバースト波で計測を行い、100 Hz 前後に埋設物の反応を確認した。その後加振力を上げるため、パルス持続時間を 20 ms から 60 ms に増加させ、計測時間短縮のため周波数範囲を 50-152 Hz に狭めたシングルトーンバースト波を使用して計測を実施した。

10/19～21 および 2/24～26 の実験では、埋設物の周波数範囲が既知であるため 50-152 Hz のシングルトーンバースト波で非接触音響探査法の計測を行った。使用波形を図 3.3.2.7 に示す。

表 3.3.2.1 2020 年度における主な使用波形の変遷

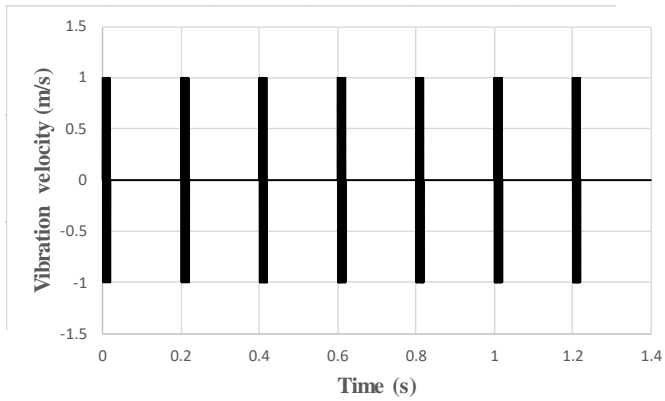
日付	波形	周波数範囲	埋設物種類	埋設物サイズ	土の種類
8/12～13	マルチトーンバースト波	100-600 Hz	ホーロー容器	100 mm	赤土
	シングルトーンバースト波	450-600 Hz			
8/17～18	マルチトーンバースト波	100-600 Hz	ホーロー容器	180 mm	赤土
	シングルトーンバースト波	50-200 Hz			
10/12～14	シングルトーンバースト波	50-200 Hz	ポールベース	300 mm	赤土
		50-152 Hz			関東ローム
10/19～21	シングルトーンバースト波	50-152 Hz	ホーロー容器	180 mm	赤土 関東ローム
2/24～26	シングルトーンバースト波	50-152 Hz	ポールベース	300 mm	赤土

(2020/8/12-13、100 mm ホーロー容器)



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

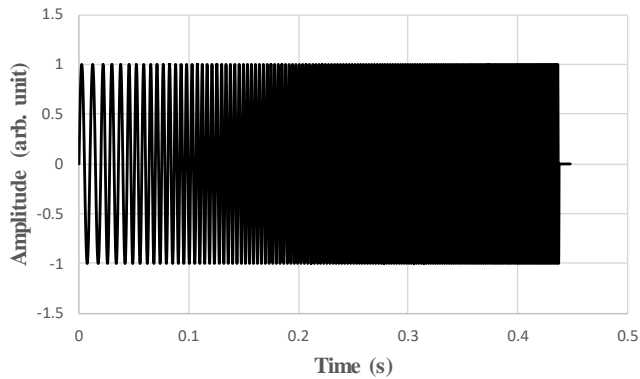
図 3.3.2.1 マルチトーンバースト波：100-600 Hz



周波数範囲	450-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.2 シングルトーンバースト波：450-600 Hz

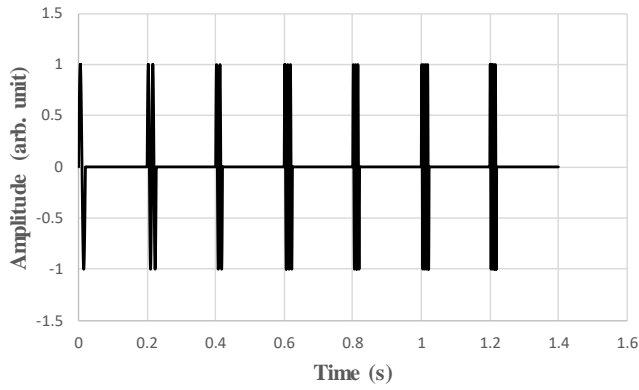
2020/8/17-18、180 mm ホーロー容器



周波数範囲	100-600 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	448 ms
波形全体の長さ	448 ms

図 3.3.2.3 マルチトーンバースト波：100-600 Hz

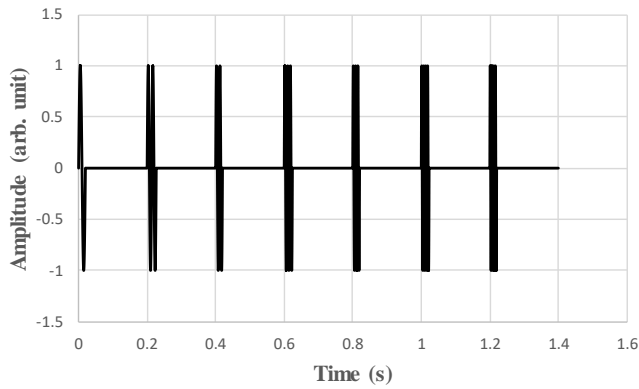




周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

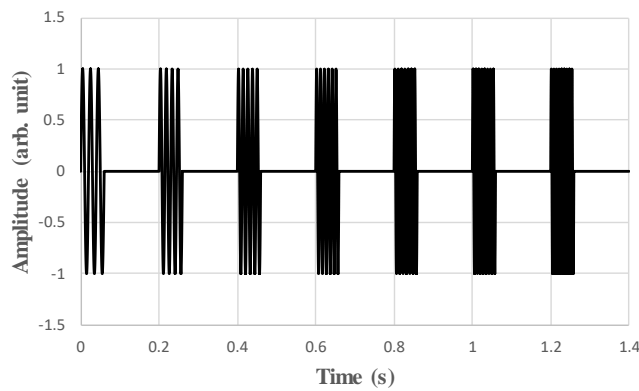
図 3.3.2.4 シングルトーンバースト波：50-200 Hz

2020/10/12-14、300 mm ポールベース



周波数範囲	50-200 Hz
変調周波数	25 Hz
パルス持続時間	20 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.5 シングルトーンバースト波：50-200 Hz

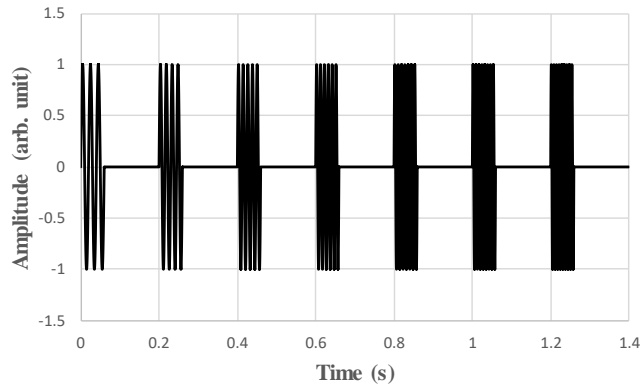


周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.6 シングルトーンバースト波：50-152 Hz

2020/10/19-21、180 mm ホーロー容器

2021/02/24-26、300 mm ポールベース



周波数範囲	50-152 Hz
変調周波数	17 Hz
パルス持続時間	60 ms
インターバルタイム	200 ms
波形全体の長さ	1400 ms

図 3.3.2.7 シングルトーンバースト波：50-152 Hz

### 3.3.3 加振力の違いが映像結果に及ぼす影響

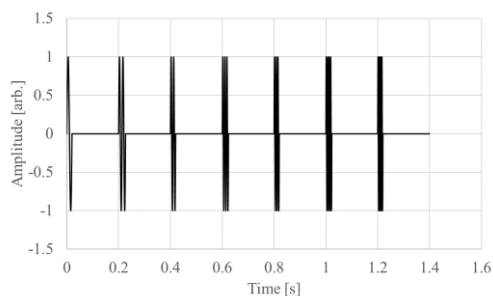
(比較したトーンバースト波)

2020/10/12~14 につくばに埋設物試験場 2 (赤土) にて、深さ 100 mm に埋設した 300 mm ポールベースを非接触で測定を行った。この際、音波のパラメータによる振動エネルギー分布について検討を行った。表 3.3.3.1 に使用したトーンバースト波のパラメータを示す。

表 3.3.3.1

周波数範囲	50-200 Hz	50-152 Hz
変調周波数	25 Hz	17 Hz
パルス持続時間	20 ms	60 ms
インターバルタイム	200 ms	200 ms
波形全体の長さ	1.4 s	1.4 s

(a)



(b)

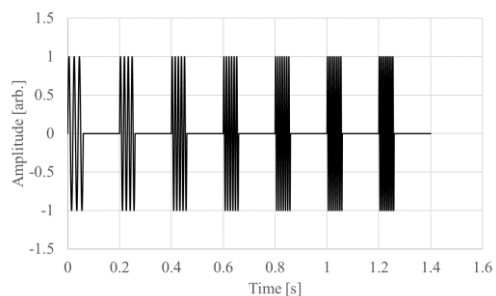


図 3.3.3.1 送信波形例

(a)周波数範囲：50-200 Hz、(b) 周波数範囲：50-152 Hz

**(実験セットアップ)**

この実験では深さ 100mm に埋設された直径 300 mm のプラポールベースを埋設物として使用した。実験セットアップを図 3.3.3.2 に示す。測定エリア中央から約 1.9 m の位置にレーザドップラ振動計を設置し、音源は測定エリアの直上約 0.7 m にあるものとする。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500 Xtra を使用した。

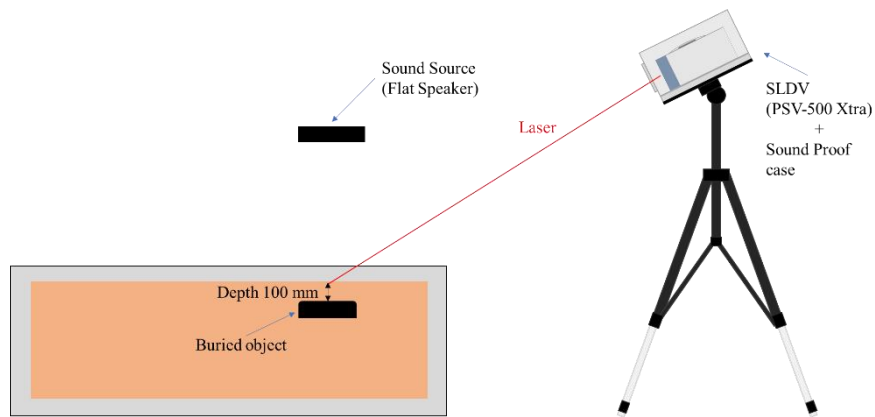


図 3.3.3.2 実験セットアップ図

**(測定結果)**

図 3.3.3.3 に測定エリアを示す。測定点数は 99 点(縦 9×横 11 points)とし、測定点間隔は縦 40.32 mm、横 51.19 mm である。測定エリア中央に直径 300 mm の紙を置き、測定点密度の調整を行った。



図 3.3.3.3 測定エリア

次に振動エネルギー分布を図 3.3.3.4 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域と同じとした。

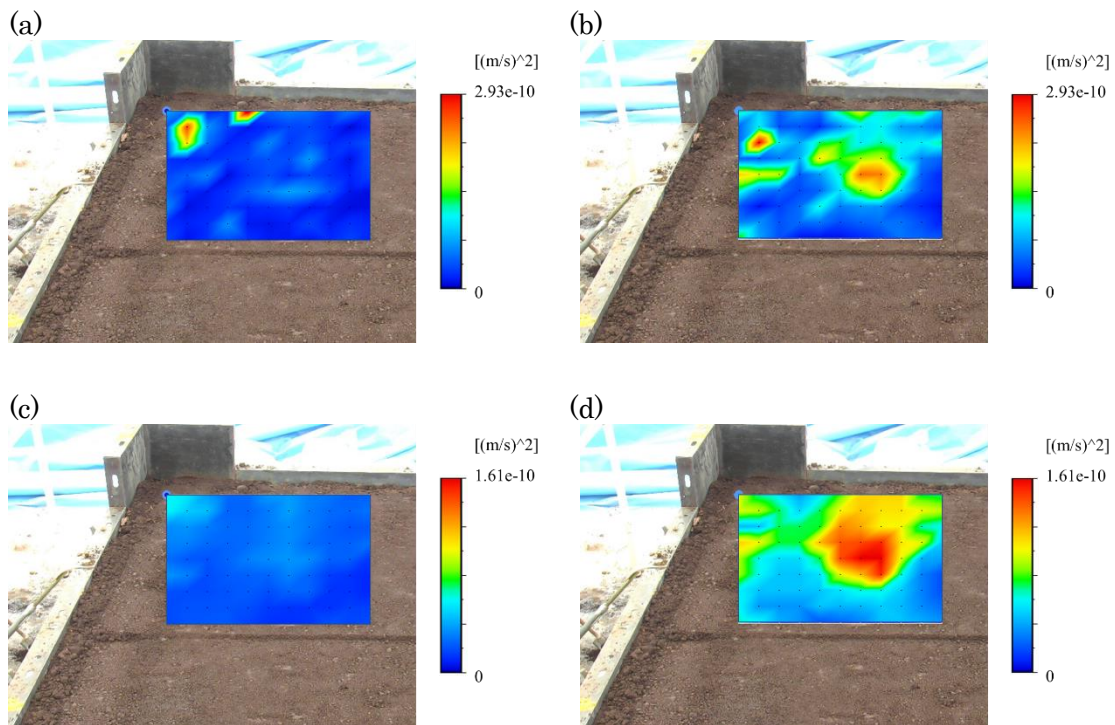


図 3.3.3.4 振動エネルギー分布

- (a)周波数範囲：50-200 Hz、(b) 周波数範囲：50-152 Hz  
 (c)周波数範囲：50-200 Hz、メディアンフィルタ適応後  
 (d)周波数範囲：50-152 Hz、メディアンフィルタ適応後

図 3.3.3.4(b)(d)よりパルス持続時間の長い(60 ms)音波を照射した測定結果は、測定エリア中央付近に振動エネルギーが高い測定点が密集している事が確認出来る。一方、パルス持続時間の短い(20 ms)音波を照射した測定結果は、その傾向が確認出来ない。これは埋設深さ 100 mm の深さに埋まっている物を励振するのに必要な音響エネルギーを満たしていたかどうかの影響したのではと考察する。図 3.3.3.5 に埋設物上の振動速度スペクトルを示す。

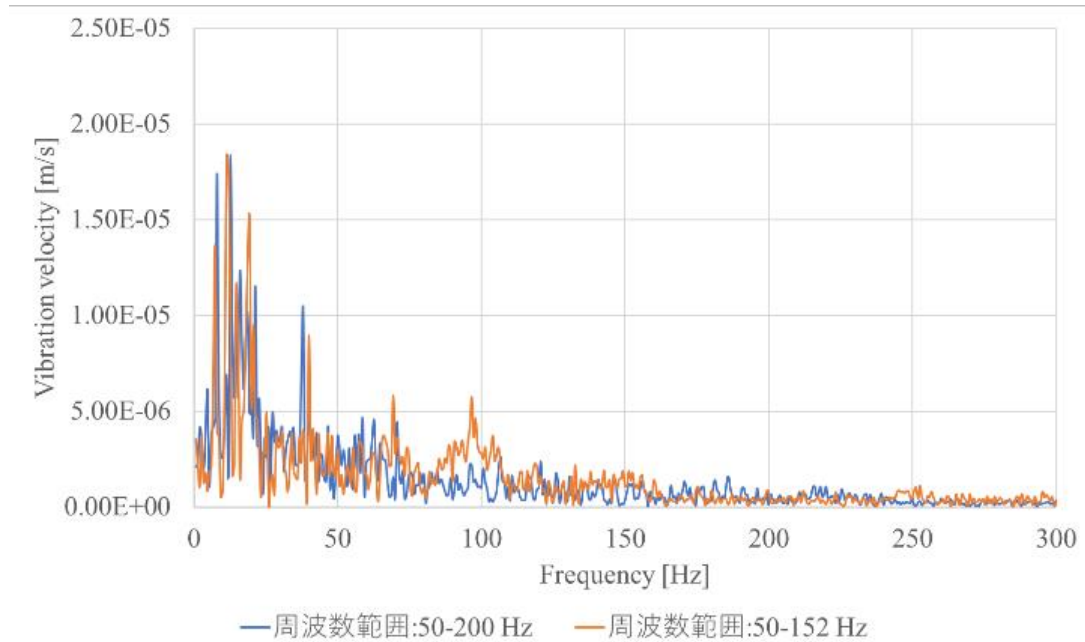


図 3.3.3.5 振動速度スペクトル比較

図 3.3.3.5 よりパルス持続時間が 60 ms 音波を照射した場合(橙線)は 100 Hz 付近にピークがあるが、パルス持続時間が 20 ms の場合はピークが確認出来ない。したがって、深い場所に埋まっている埋設物を探査する場合には相応の音響エネルギーが求められる事が判明した。

### 3.3.4 まとめ

地中探査用の音波照射加振波形については、コンクリート構造物の欠陥探査用のトーンバースト波を基本にして、計測速度を優先したインターバル時間を省略したマルチトーンバースト波、加振力を重視してパルス持続時間が長くしたシングルトーンバースト波が考案された。それぞれの特徴としては、前者は遠距離から高速にスキャンを行いたい場合に適しており、後者は比較的大きめの埋設物（直径 180~300 mm）を明確に検出したい場合に適しているといえる。

### 3.4 UAV を用いた計測システムの構築

#### 3.4.1 試作した音源搭載型 UAV の概要と計測システムの構築

##### (試作した音源搭載型 UAV の概要)

今回試作した音源搭載型 UAV 写真を図 3.4.1.1 に示す。ベースとなる機体は DJI 社の Matrice 600 PRO で、機体下部に平面スピーカー、アンプ、FM 受信機、レーザ距離計および小型の CCD カメラを搭載している。機体の重さは約 10 kg で、飛行可能時間は約 20 分程度である。また、脚部にはカーボン製の着陸脚を装着しているが、これは、UAV を着陸させて計測する場合に、地表面から音源までの距離をとることにより、LDV による地表面の面的な計測を容易にするためである。

なお、この機体には RTK (Real-Time Kinematics) が搭載されている。この RTK とは正式には RTK-GNSS (Real-Time Kinematics - Global Navigation Satellite System) と呼ばれるもので、地上等に設置した「基準局」からの位置情報データによって、高い精度の測位を実現する技術である。位置情報を送る衛星システムに依存しているため、衛星電波が届かないところでは使用できないという欠点があるものの、上空に障害物の無い場所では、GPS のみを使用した場合と比べると UAV の位置精度が格段に向上させることができる。



図 3.4.1.1 地中探査用に試作された音源搭載型 UAV の写真(2019 年 12 月 16 日)

### (UAV を用いた計測システムの構築について)

UAV を用いた計測システムの概要を図 3.4.1.2 に示す。本計測では、UAV からの音波照射加振を LDV のある基地局側から、波形も含めてすべて無線制御し、かつ LDV による計測と完全に同期させる必要がある。照射加振に用いる波形はトーンバースト波と呼ばれる特殊な波形であり、任意波形発生器により発生することができる。その波形を UAV 側に伝送する方法として、今回は FM 送受信機を採用している。理由は遠距離でも安定した送受信が保てることと、および Bluetooth のような遅延時間がほとんど発生しないため、LDV 側との同期計測に適していることが挙げられる。LDV 側の計測と UAV 側の音波照射加振の同期は、任意波形発生器により行うことができる。この時、無線電波およびレーザー光の伝搬速度は音波の伝搬速度に比べると圧倒的に早いため、UAV と LDV の距離が離れても遅延時間はほぼ無視することが可能である。波形変更や音圧調整も任意波形発生器により行うことができるため、LDV のある基地局側から音波に関する調整はほぼすべて実施可能である。

また、計測する地表面が観測できるように UAV 搭載の CCD カメラは平面音源よりも外側に取り付けられており、真下の映像を UAV 操縦者が確認できるようになっている。UAV の音源から地表面までの距離は、UAV に取り付けられたレーザ距離計（レーザレンジファインダ）により計測することができる。これは当初、別途 PC に表示するようになっていたが、UAV 操縦者が距離を把握しにくいと、令和 2 年 7 月に距離表示ユニットを別途作製して頂いている。

地表面での音圧は、送信波形毎に騒音計で確認しているが、音源と地表面の高さが分かれば、任意波形発生器側の電圧調整で対応可能である。

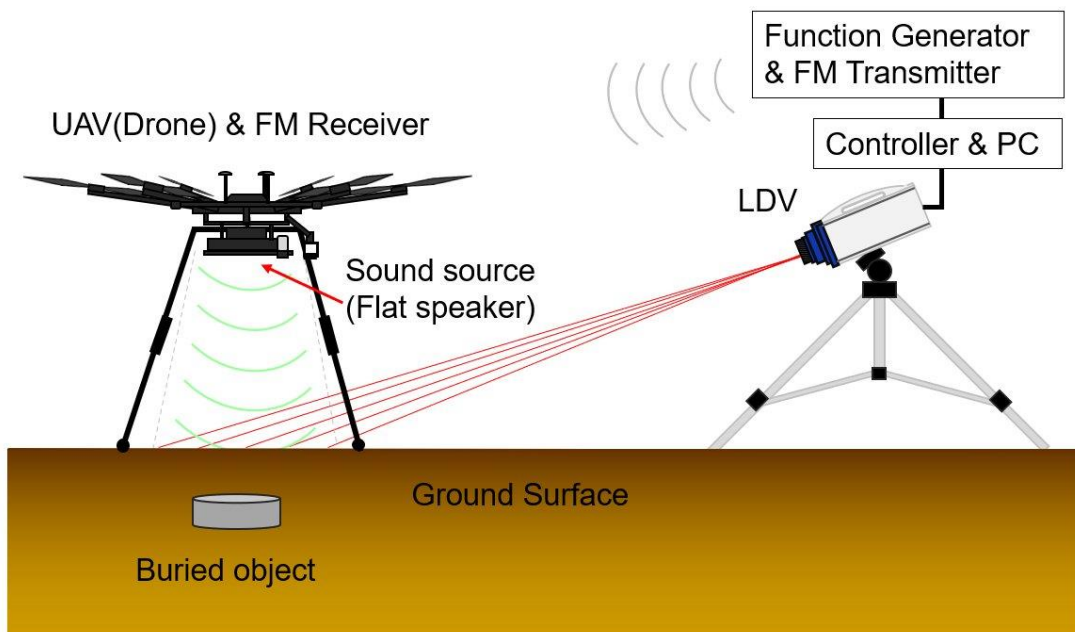


図 3.4.1.2 UAV を用いた計測システムの概要

### 3.4.2 UAV の改良と検証

#### 3.4.2.1 UAV の防振設計について

##### (問題点)

音源を搭載した UAV を使った非接触音響探査では、UAV の使用場面は 2 つに大別される。一つは、飛行しながら音を照射するもので、壁などの垂直面を検査対象とする。もう一つは、狙った場所まで飛行したあと着地して、その周りの地面など水平面を検査対象として照射する。後者の場合、飛行に使うバッテリーを節約し、その分、長めの計測にまわせるという長所がある。

防振が必要となるのは後者の場合である。図 3.4.2.1 に示すように、地面に向けて平面音源から一様な探査用の音(a)を放射するが、これと同時に音源自体の振動(b)が UAV の着陸装置（以下'脚部'と記す）を経由し接地面に伝わってしまう。音源の発する平面音波(a)を加振力にして埋設物を探査する本手法にとって、脚部を経由し地面に伝わる振動(b)は、探査対象である地面に局所的な擾乱(ノイズ)を与えることになり、測定精度を低下させるため、可能な限り遮断する必要がある。

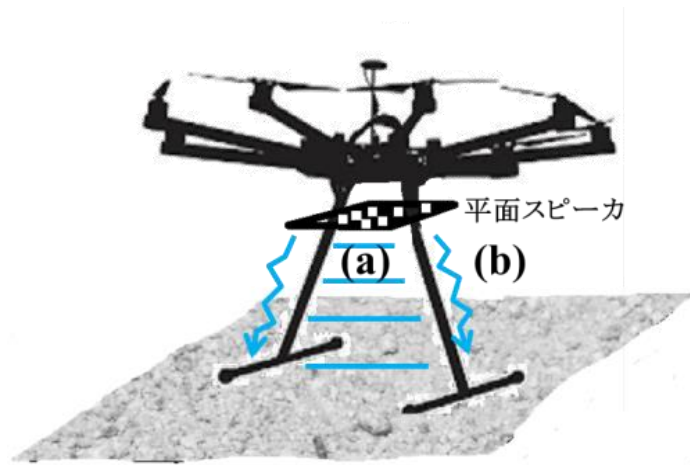


図 3.4.2.1 探査用音波(a)と脚部経由の振動伝播(b)

##### (遮断量の目標)

脚部から接地面への振動の遮断を検討する。音源搭載 UAV は新構造であり、遮断量として相場値もないため、現状に対し、 $-40 \text{ dB}$  ( $=1/100$ ) ,at  $50 \text{ Hz}$  と仮置きした。 $50 \text{ Hz}$  は音源の放射特性の低周波における実用的な適用下限で、出せる音量が限られ、S/N 比の確保が難しいことからノイズ低減を最も必要とする周波数である。 $40 \text{ dB}$  は、1つの目安とした“2桁低減 ( $=1/100$ ) ”である。

##### (具体的遮断設計の案)

遮断案としては、質量(増加)、バネ(低下)が考えられるが、UAV の飛行性能の負担となる質量増量は除外した。図 3.4.2.2 にはバネによる対策 3 案を示す。



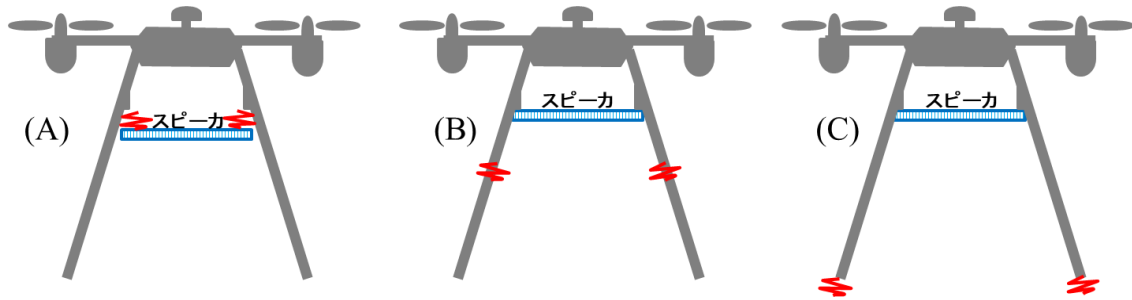


図 3.4.2.2 (A)音源バネ懸架 (B)脚部へのバネ挿入 (C)脚部下部へのバネ装着

各案とも一長一短があるが、(B),(C)案にて 40 dB の遮断を得るためには、それぞれ部材の軸方向剛性、接地面剛性を大幅（例；2.3 N/mm 以下≒台所用スポンジ（3M 製 Scotch Brite™ 115×72×30 mm<sup>3</sup>に、1 脚当たりの分担荷重である 2.5kg 重(=24.5N)をかけたときの測定結果）のバネを脚部 4 隅に配し、UAV 総質量を 10 kg と仮定）に低減する必要がある。しかし、これによって脚部の座屈性（折れ曲がり）、接地時のドローンの安定性（ぐらつき）、泥付きによるバネ定数の劣化などが必至で、補償は容易でない。

一方、(A)案は、起振源（音源）に近い上流対策で、効果的かつコンパクトに実現できる可能性があり、この案に絞って検討することとした。

#### （遮断量の見積もり）

上述(A)案の遮断量の計算に当たっては、音源振動は上下とし（起振力  $F_0$  Newton）、かつ音源は集中質量（質量  $M$  Kg）として扱う。音源の 4 隅で柔らかいバネ（剛性  $K$ ；4 個の並列バネの和 Newton/mm）によって懸架されるものとして、図 3.4.2.3 に示す単純な 1 自由度系モデルで計算した

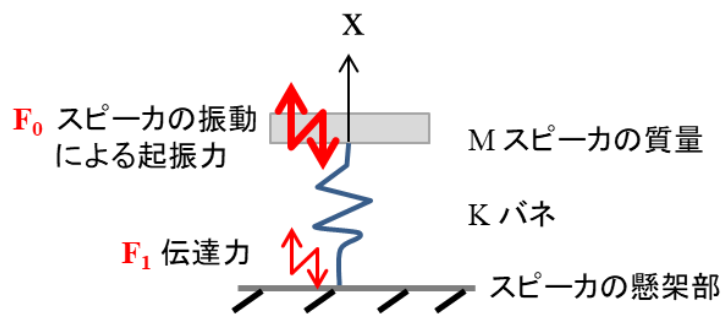


図 3.4.2.3 遮断量計算のための 1 自由度振動モデル

## (振動方程式)

図 3.4.2.3 から,振動方向の上下方向座標を  $x$  として、力の釣り合いから

$$M\ddot{x} + kx = F_0 \quad \text{---(3.4.2.1)}$$

定常解のみを求めれば

$$x = \frac{F_0}{k - M\omega^2}, \quad \omega = 2\pi f \quad \text{---(3.4.2.2)}$$

伝達力  $F_1$  は  $k \cdot x$  であるから、遮断量  $\text{Trans} = F_1/F_0$  として、

$$\text{Trans} = \frac{k}{k - M\omega^2} \quad \text{---(3.4.2.3)}$$

となる。

(遮断量を満たすバネ定数  $k$  の同定)

図 3.4.2.4 には音源質量として実験に使った音源の実測値  $2 \text{ kg}$  を使い、2 値のバネ定数  $k$  (Newton/mm)  $2 \text{ N/mm}$ 、 $0.72 \text{ N/mm}$  で遮断量を計算した例を示す。それぞれ、 $50 \text{ Hz}$  で、 $40 \text{ dB}$ 、 $49 \text{ dB}$  の遮断量が得られることになる。ここで、バネ定数のイメージを身近な輪ゴム(1 本のバネ定数は  $0.02 \text{ N/mm}$ :筆者測定)で示せば、 $2 \text{ N/mm}$  の場合では 100 本相当である。100 本で音源の四隅を懸架するから、1 隅あたり 25 本となる。更に、 $0.72 \text{ N/mm}$  の場合、1 隅あたり、9 本となる。

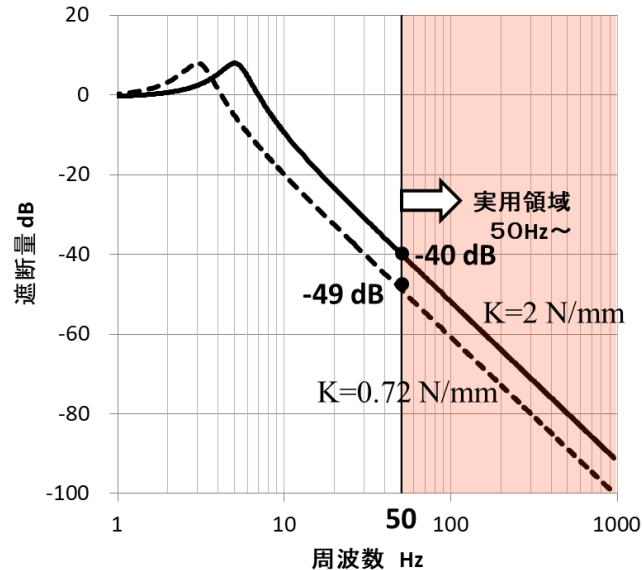


図 3.4.2.4 遮断量の計算 ; バネ定数 2 種

## (バネと構造の具体的な設計)

以上のとおり、バネの選択が最大の要点となる。遮断量面からは極力低いバネの選択が望ましいが、実現にあたり幾つかの課題がある。課題の洗い出しのため、輪ゴムを使った、手作り品での実機評価とともに、机上では簡単な故障の木解析(Failure tree analysis FTA)

を行い、不具合の予防と対処に備えた。この過程で得た要点と対処は以下の通りである。

(1) バネ本体

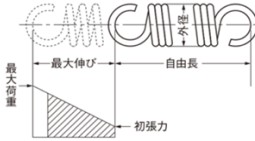
- ① 耐久性；ゴムでも可能かつ簡便だが、長期間保管すると疲労で脱落の可能性  
→設計許容荷重内のステンレスバネ（SUS系）
- ② 塑性変形；低いバネ定数の場合（金属、ゴムでも）長時間の保管（数か月）中に塑性変形でいわゆる‘伸び’、あるいは、バネ定数の増加の可能性あり  
→保管時にはバネが使われない構造とする

(2) バネと音源の存在空間

- ① 上下の生存空間；バネ定数を下げると音源の垂れ下がりが大きくなる  
→自重での移動変位はせいぜい 30mm 位へ
- ② 左右の生存空間；バネ懸架のため、音源は“ぶらんこ”状態となるため、飛行中に周りの部品、例えば脚部との干渉が懸念される  
→四隅のバネの傾斜支持による横変動抑制  
→ストッパーによる大变位を規制する

以上から、また汎用性を考慮し、バネは図 3.4.2.5 に示す、市販の以下のミスミ社製を使い、コンパクトに UAV に懸架、格納する構造とした。

メーカー:株式会社ミスミグループ  
型番 22-0532



指定中の仕様・寸法情報		スピーカは2kg(19.6N): 各隅で4.9N分担 OK	
材質	SUS304-WPB	種類	標準タイプ
最大荷重(範囲指定)(N)	3.51~8.00	フック対向角	180°(標準)
最大荷重(N)	5.69	自由長(mm)	25
外径(φ)	5	初張力(N)	0.716
ばね定数(N/mm)	0.181	線径(φ)	0.5
最大伸び(mm)	26.9	RoHS ?	10

出典先: <https://jp.misumi-ec.com/vona2/detail/221000572289/?HissuCode=22-0532>

スピーカ2kgにより変位 27mm(<30) OK

図 3.4.2.5 選択したバネとその特性

最終的には以下の図 3.4.2.6 に示す設計とした。

この製品としての遮断性能は、四隅のバネのバネ定数  $k$  は  $0.72 (=4 \times 0.181)$  N/mm で図 3.4.2.4 の破線の特性となり、50 Hz で 49 dB の遮断量と当初の仮目標を達成するものとなった。

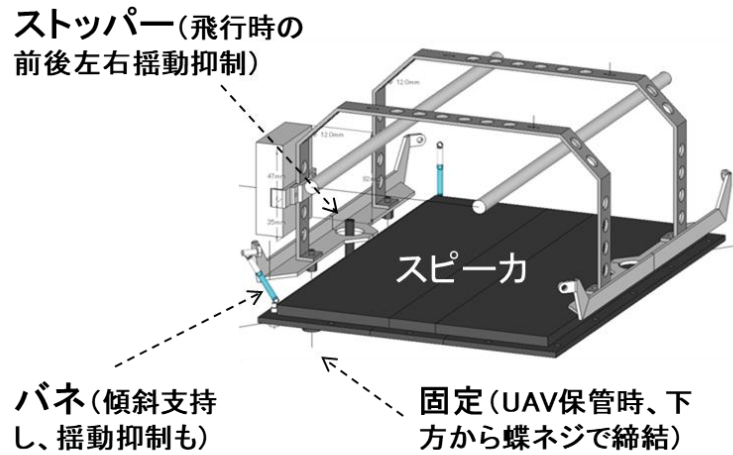


図 3.4.2.6 UAV の音源マウント改良案（最終設計仕様）

**(改良後の音源マウント部)**

改良後の音源マウント部の写真を図 3.4.2.7 に示す。この写真では平面音源が 4 本のバネのみにより保持されている状態、いわゆるフリーマウント状態となっている。なお、機体側に 4 本のネジで固定することもできる（リジッドマウント状態）。

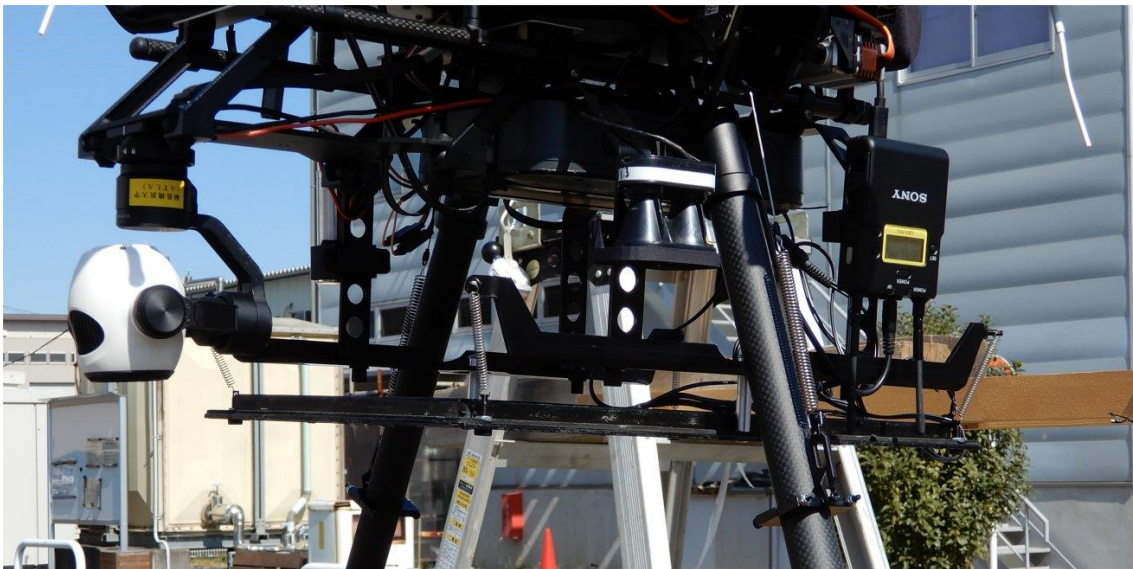


図 3.4.2.7 改良後の UAV 音源マウント部（2021 年 2 月 24 日）

**(四隅のバネの傾斜支持による横変動（揺動）の抑制について)**

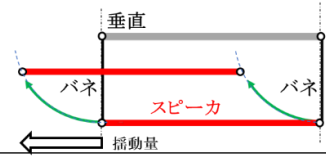
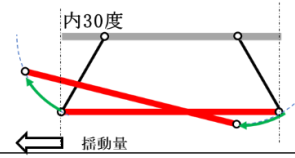
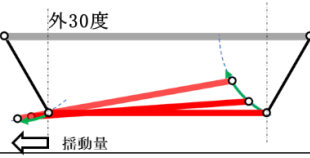
バネに懸架される音源は“ぶらんこ”のように左右（および、前後）に揺動する。本機ではこの抑制のため音源を傾斜支持構造としたが、その効果のメカニズムについて以下に記す。ただし、この抑制効果を定量、かつ厳密に表わすには、現象が大変位で非線形、かつ、

過渡現象であることから、コンピュータによる数値的解法が必要でハードルが高い。そこで、代替策として、簡便な実験モデルを作り、その運動を観察し、以下の2つの側面から相互補完的に揺動抑制のメカニズムを考察した。

#### ・機構学的な解釈

音源は4点で支持しているが、その揺動の様子を前方、あるいは側方から見た2次元で考察する。表1にバネを伸び縮みしないリンク、天井の支持部を静止リンク、下端の音源もリンクとした、いわゆる“4節リンク機構”を使って音源の揺動モードを示す。

表 3.4.2.1 音源の懸架法と振動モード (図は、左に揺れた時)

懸架法	垂直吊り	斜め吊り (ハの字30度)	斜め吊り (逆ハの字30度)
運動モード			
	並進 (左右、上下のみ)	並進+回転	並進+回転
左右の揺動量	比較のベース	低減 (回転の分だけ、垂直吊りより縮小)	低減 (ハの字より小)

注：表中のバネ長は図 3.4.2.6 より長く見えるが、図 3.4.2.6 では無荷重状態のバネを示しており、実稼働状態でスピーカの重量を支えるため、バネ長は約 1 0 0 mm に伸びて、表 3.4.2.1 のイメージとなる。

ここで懸架法は、垂直吊りに対し、斜め吊りは、‘ハ’の字吊り、逆‘ハ’の字吊りが考えられる。本機では、逆‘ハ’の字吊りを採用しているが、懸架の効果を比較するため‘ハ’の字吊りも加えた。表から、斜め吊りとすることで、スピーカの運動は左右への並進運動に回転(回頭)が加わることで左右揺動量が低減していることがわかる。特に、この揺動量の低減は、本機で採用の逆‘ハ’の字吊りでより大きいこともわかる。

#### ・振動としての解釈

考察のため、音源部を鉄棒、バネ部を細い紐で表 3.4.2.1 の実物モデルを作り、左右方向に叩いて(打撃して)その運動を観察してみた。結果、垂直吊りでは、左右、上下の並進のみが生じるのに対し、斜め吊りでは表 1 のように、左右への打撃の直後から並進と回転(回頭)が生じている。すなわち、斜め吊りでは並進と回転が強く連成した振動モードとなる結果、左右方向に入れた打撃のエネルギーは、並進と回転の両モードに分散し注入されることがわかる。従って、振動面からは、斜め吊りによる、振動(左右の並進方向)抑制効果は、回転モードが打撃のエネルギーを負担した結果、並進モードへのエネルギー注入量が削減されたためと解釈される。

### (UAV 脚部の改良案)

図 3.4.1.1 に示すように音源搭載型 UAV の脚部は、着陸時の計測を想定して、カーボン製の 4 本脚が装着されていた。しかしながら、UAV 着陸時には、搭載音源の振動が、この脚部を通じて、地面に伝搬することがあることが明らかになった。そのため、音源の高さは変更せずに、着陸脚の構造を変更することにより、脚部からの振動伝搬を低減すると同時に、計測エリアの拡大を行った。具体的には、図 3.4.2.8 に示すように UAV 本体に最初から付属している 2 本の着陸脚を延長して接地場所を音源直下から離すと同時に、4 本脚をやめて、2 本の棒もしくは四角い棒を設置面に取り付けて、UAV 本体の荷重が分散するようにした。



図 3.4.2.8 音源搭載型 UAV の着陸脚の構造の変更

### (改良後の UAV の着陸脚)

改良後の UAV 着陸脚の状態がわかる写真を図 3.4.2.9 に示す。カーボン製の四角い棒 (約 920 mm 角) を接地部とすることにより、脚部の強度を保ちつつ、スキャン領域の拡大が達成できていることがわかる。



図 3.4.2.9 音源搭載型 UAV の着陸脚(2021 年 1 月 25 日)

### 3.4.2.2 改良後の検証評価

#### (背景と課題)

音源搭載型 UAV を着地した状態で音波照射加振を行った場合、図 3.4.2.10 中の左図に示すように、音源から放射される探査用の音波(a)とは別に、音源自体の振動が UAV の脚部を経由し地面に伝わる固体伝播成分(b)がある。この成分は、地面に局所的な擾乱(ノイズ)を与え、測定精度を低下させるため、伝搬経路の中で可能な限り防振(遮断)する必要がある。

解決法となりうる防振案の中から、図 3.4.2.10 中の右図に示すように、音源 4 隅をバネで懸架する案を選択し、音源マウント部の改良を実施した。完成した実機を用いて、台上加振実験でその効果確認実験を実施した。

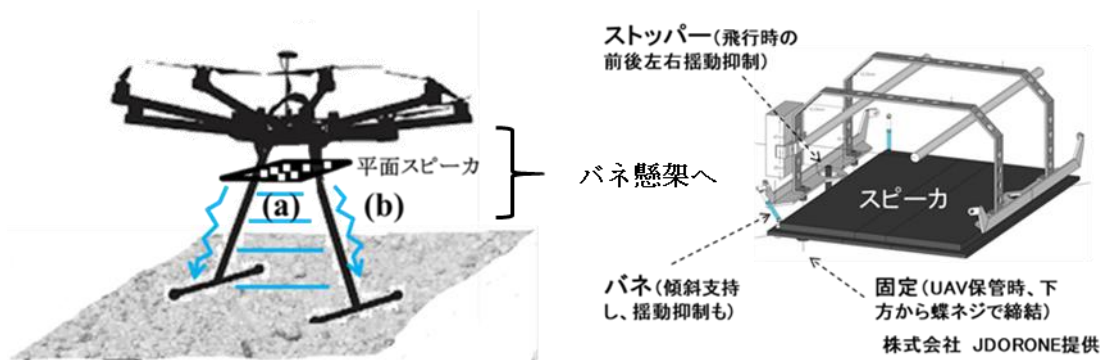


図 3.4.2.10 左：探査用音波(a)と脚部経由振動伝播(b)， 右：バネ懸架設計構造

#### (防振量の目標)

音源搭載 UAV は新機構であり、防振量の相場もないが、開発のため現状に対し、-40 dB (=1/100), at 50 Hz と仮置きした。50 Hz は UAV に搭載された平面音源の放射特性における低周波側の適用下限で、出せる音量が限られ、S/N 比の確保が難しいことからノイズ低減を最も必要とする周波数である。40 dB は 1 つの目安で“2 桁低減 (=1/100)”を意味している。

#### (台上実験法)

図 3.4.2.10 の固体伝播成分(b)に対する防振量の改善度をインパクト加振によって評価する。定量値として以下を使った。

$$\text{脚部振動(m/sec) } V \quad / \quad \text{音源への振動入力(Newton) } F$$

この物理量は、振動入力(F)と、伝搬先における振動速度(V)との比であり、比  $V/F$  が低いほど優れた防振といえる。次元は  $V/F = \text{モビリティ(m/(Newton*sec))}$  で、伝達モビリティである。本実験では、防振機構の有りと、無しとの 2 仕様でこの物理量を測定し、その差分により防振効果を評価した。

図 3.4.2.11 に実験のセットアップを示す。UAV は頑丈な実験台の上に置いている。また、実験時は、室内の空調も止めるなどノイズとなりうる音、振動を可能な限り抑えるべく配慮した。



図 3.4.2.11 台上実験 a)入力(F) b)出力(V)

(a)は入力部で、音源の中央部をインパルスハンマーで面直方向に打撃する。入力(F)はインパルスハンマーの先端に内蔵された力計で計測される。一方、出力は、脚部下端のバーの中央部(b)の上下方向振動速度(V)で代表し、LDVにより計測した。

図 3.4.2.11 に入力信号と出力信号の具体例を示す。精度を確保するため、ハンマーによる打撃は 10 回以上を目安とした。

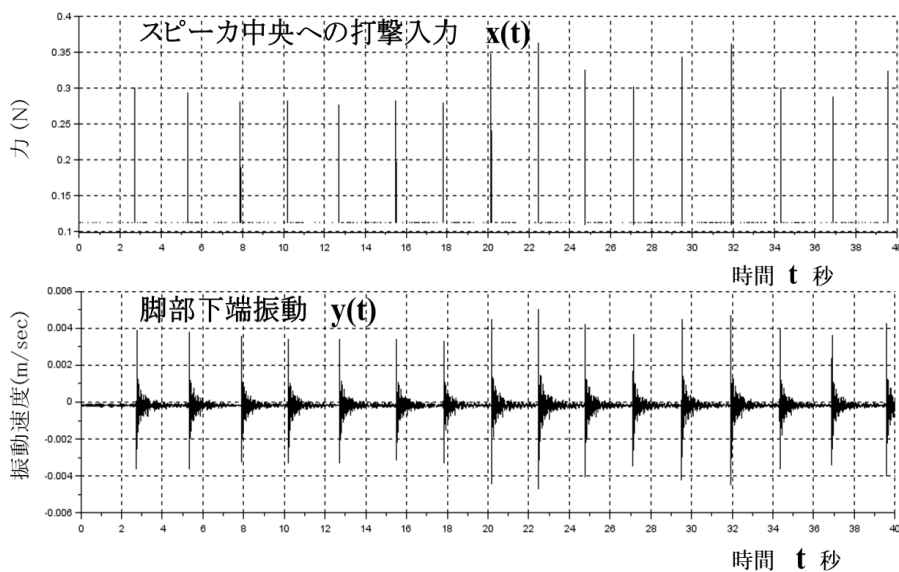


図 3.4.2.12 ハンマーによる打撃力(入力)と、脚部下端の振動(出力)の時系列波形



この例は防振構造のない仕様で行ったものであるが、約 2 秒間隔で 16 回ほど打撃している。インパルス状の打撃入力  $x(t)$  に対して、脚部下端では減衰する波形  $y(t)$  となっていることがわかる。

### (防振 (伝達モビリティによる) の計算)

振動伝達は、入力  $x(t)$  のフーリエ  $X(f)$  と、出力  $y(t)$  のフーリエ  $Y(f)$  の比をとり、伝達モビリティ  $H=X(f)/Y(f)$  で算出する。10 回以上の試行に対し平均処理を行うため、計算手法としては、(3.4.2.4)式で計算されるクロススペクトル法を使った。ここで  $i$  は、試行回である。上述のように試行総数は 10 回以上としたが、実際は、5~6 回程度で十分な精度が確保されている。

$$|H|^2 = \frac{|E(X_i^* Y_i)|^2}{|E(|X_i|^2)|^2} \quad \dots (3.4.2.4)$$

### (実験結果)

#### 1) 実験精度の限界値の見極め：出力部の振動から

伝達モビリティ  $H$  を計算する前に、実験精度の限界値を見極める上で、実験で得られた脚部振動 (出力) のスペクトルを、入力を入れていない状態での振動レベル (以下、暗振動レベル) と比較して図 3.4.2.13 に示す。

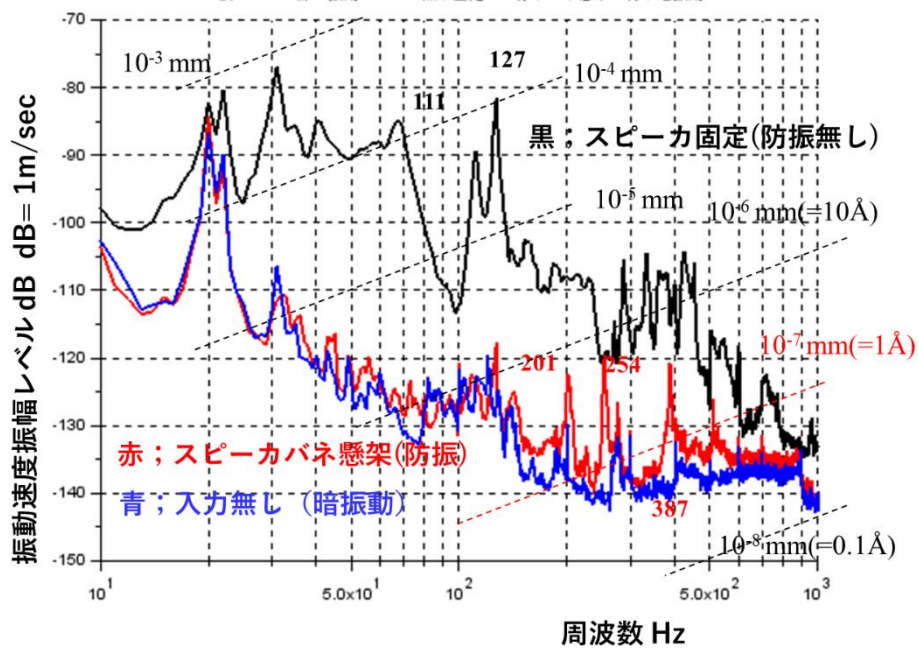


図 3.4.2.13 脚部下端振動のスペクトル(暗振動との比較)

図より、音源固定(防振無し)に対して、音源をバネで懸架した今回の防振構造の場合、50 Hz 以上で最大 30 dB 程度の防振効果が確認できる。ただし、防振効果の正確な値は、試行

回毎にインパクト力にばらつきがあるため、入力値で正規化する（すなわち 伝達関数  $H$  で評価をする）必要があり、処理結果はこの後に述べる。図 3.4.2.13 で注目すべき点は防振構造をとることによって、広い周波数域で脚部下端の振動はほぼ暗振動のレベルまで低減していることである。すなわち、防振構造により、脚部下端振動はこの実験セットアップで検出できる最小の振動レベルまで達したといえる。換言すれば、前報で示した計算では、本防振構造により 50 Hz 以上で 40 dB 以上の効果が得られたが、実験では暗振動のため、50 dB の効果を得ることはないが、それでも最大の効果が得られていることを示している。

ここで、暗振動レベルは、100 Hz を例にとれば、図 3.4.2.13 から、振動速度は  $-125 \text{ dB}(0 \text{ dB} = 1 \text{ m/sec}) = 5.6 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ 、あるいは振動振幅は  $10^{-6} \text{ mm}(10 \text{ \AA})$  と極めて小さいレベルである。本実験では UAV を、ゴムマットを敷いた実験台の上に設置しているが、この  $10^{-6} \text{ mm}$  の暗振動レベルは、実験棟自体の振動(例；耳で感知できないものの、レベル他の部屋での活動、空調など)、あるいは、空気中の微細な音波（ノイズ）などにより、脚部が励振されたものと推測している。

### (防振の評価)

防振の良否は伝達モビリティ  $H$  で評価する。前節で記したように、 $H$  は脚部下端振動のレベルを入力値で正規化することで求める。図 3.4.2.14 は図 3.4.2.13 に示した脚部下端振動を入力で正規化した伝達モビリティである。図 3.4.2.14 の全体の形状は図 3.4.2.13 と極めて似ているが、これは入力の周波数特性が広い周波数域でほぼ一定値であったことによる(すなわち、入力が極めて鋭いインパルス状で実験できたこと)。この図から、防振無し(黒線)と防振有り(音源のバネ懸架)では広い周波数域で、20~30 dB と大きな防振が得られていることが確認できる。

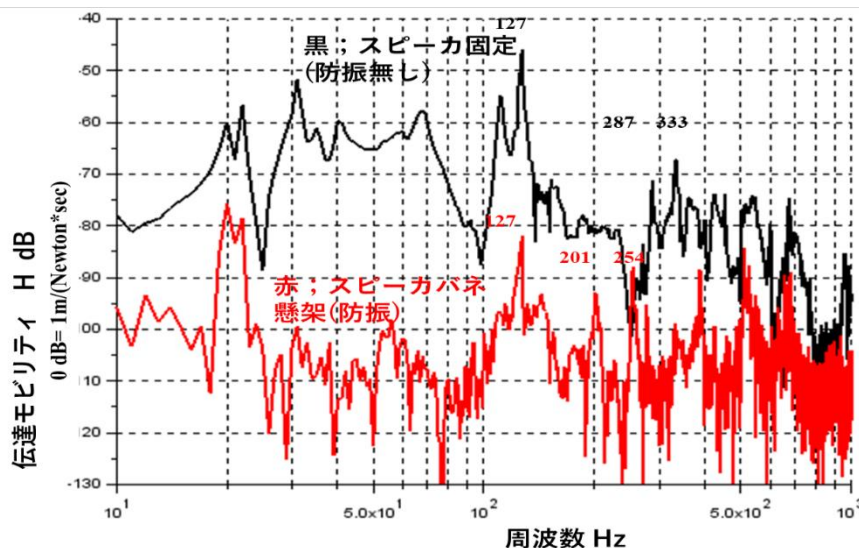


図 3.4.2.14 脚部下端への振動伝達量の比較

防振量として数値化するため、図 3.4.2.14 の防振無しと、防振有りの dB の差分を取り、

これを図 3.4.2.15 として示した。図中、0 dB に線(緑)を引いたが、この線より上が防振となる。上述のように、広い周波数域で、20~30 dB の防振が得られていることがわかる。

また、この図から、254 Hz の極めて狭い周波数で、防振の劣化領域、すなわち、通過周波数(pass frequency)域が認められる。これは音源を 4 隅で懸架するコイルバネ(図 3.4.2.10 右図参照)のサージングと呼ばれるバネ内部の共振によるもので、バネ懸架という防振構造にしたことによる跳ね返りといえる。サージングは狭い周波数域のみでおき、実用的には許容されるものと考えているが、音響探査において、探査の対象物の共振が 250 Hz に近い場合は、その影響はありうる。この場合、バネは線径 0.5 mm、外形 5 mm、長さ 30 mm と微小なこともあり、バネの周りに薄いゴム膜を巻くことでサージングは抑えられることが分かっている。フィールドでの実機稼働時に必要であればこの対応をとりたい。

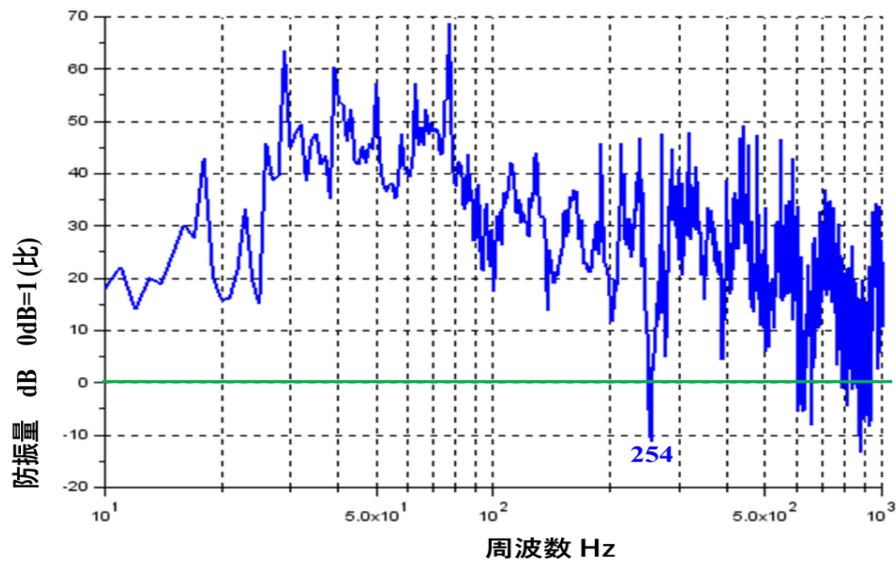


図 3.4.2.15 図 3.4.2.14 からの防振量算出

#### (まとめ)

音源マウント部と脚部の改良が行われた音源搭載が UAV を用いた台上加振実験を実施した。その結果、地面近傍の脚部下端にて、暗振動レベルまで振動が遮断でき、想定された防振効果がえられていることを確認した。

### 3.4.3 まとめ

UAV 着陸時の計測を考慮して、試作した音源搭載型 UAV の機体には、最初からカーボン製の 4 本の着陸脚が取り付けられていた。実際に着陸状態で計測してみると、音源の振動が、着陸脚から地面に伝搬していることが明らかになった。音源単体を空中に配置した場合には、明確に得られていた埋設物の映像に影響があることが明らかになったために、音源自体の UAV への搭載(マウント)方法および着陸脚自体の改良が検討された。研究室における振動計測の結果から、音源マウントの改良効果は十分であることが明らかになった。

### 3.5 構築した計測システムを用いた埋設物試験場での計測

#### 3.5.1 UAV 飛行時の基礎実験

##### 3.5.1.1 厚木の埋設物試験場における基礎実験

###### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/02/04 の厚木市にある佐藤工業(株)技術研究所の埋設物試験場(土壌はつくばの表層土(シルト)を使用)において測定されたものである。埋設物は直径18cmのホーロー容器とし、埋設深さは土壌表面から約50mmとした。実験セットアップを図3.5.1.1に示す。埋設物の直上の約1mに音源搭載型UAV(DJI社Matrice 600 PROを外注改造したもの)を飛行させ、埋設物から約2mの離隔でレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計はPSV-500Xtra(Polytec Japan Corp.)を使用した。送信音波としてはマルチトーンバースト波を用い、地表面付近の音圧は約93~96dB程度とした。

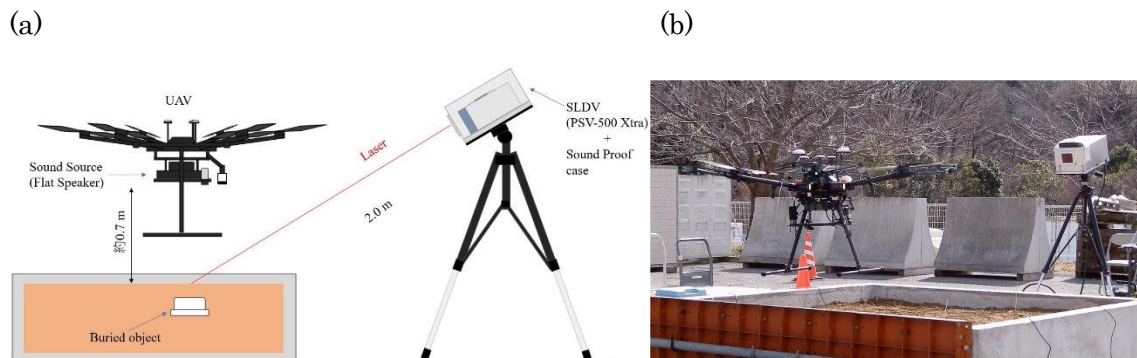


図 3.5.1.1 厚木の佐藤工業(株)技術研究所における実験セットアップ図

(a) 実験セットアップ図、(b)実験時の写真

###### (実験結果例1・・・音源固定時)

比較用に、音源を台に固定(地表面からの高さ約700mm)した場合の探査例を示す。図3.5.1.2は深さ50mmに埋設した180mmホーロー容器計測時のスキャンエリアである。

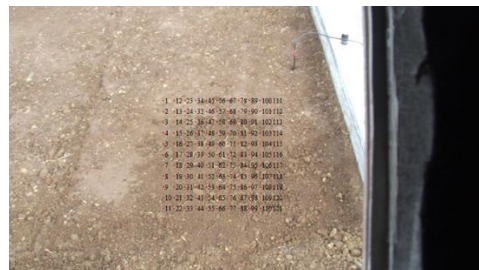


図 3.5.1.2 スキャンエリア図 (11×11=121 points)

計測点数は121(=11×11)ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピー

の分布図を図 3.5.1.3 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.5.1.4 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のシングルトーンバースト波を用いた。音圧は約 94 dB である。データの加算平均は行っていない（実験例 2 および実験例 3 も同様）。

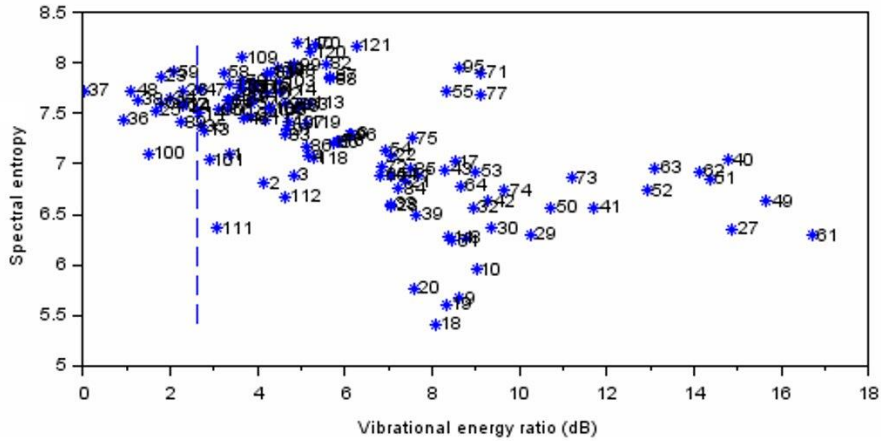


図 3.5.1.3 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

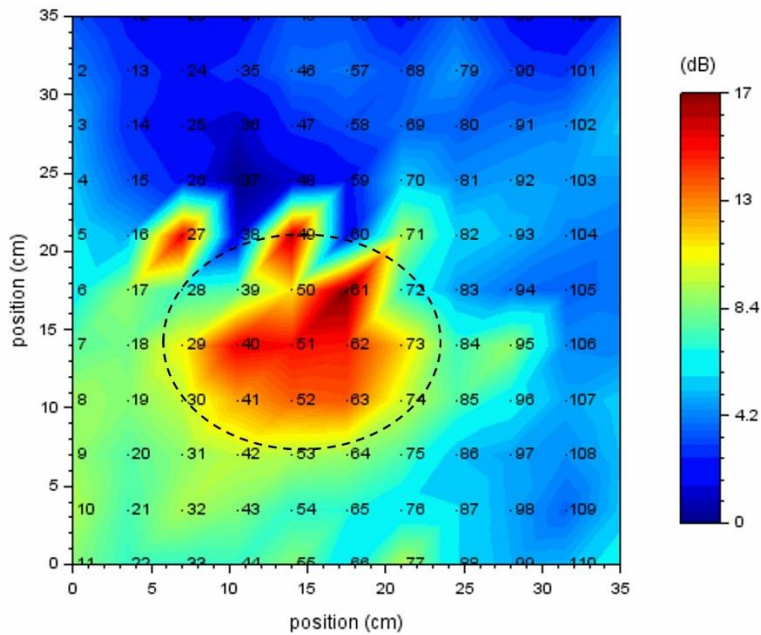


図 3.5.1.4 振動エネルギー比による映像結果例

音源固定時には、ほぼ明瞭に埋設物が捉えられていることが分かる。  
（黒破線円は埋設物の想定位置を示している。）

(実験結果例 2・・・ UAV 飛行時 1)

次に UAV 飛行時の音波照射時の結果例を示す。図 3.5.1.5 は深さ 50 mm に埋設した 180 mm ホーロー容器計測時のスキャンエリアである。



図 3.5.1.5 スキャンエリア図 (11×11=121points)

計測点数は 121 (=11×11) ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.5.1.6 に、振動エネルギー比分布図を図 3.5.1.7 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用いた。音圧は約 93 dB である。

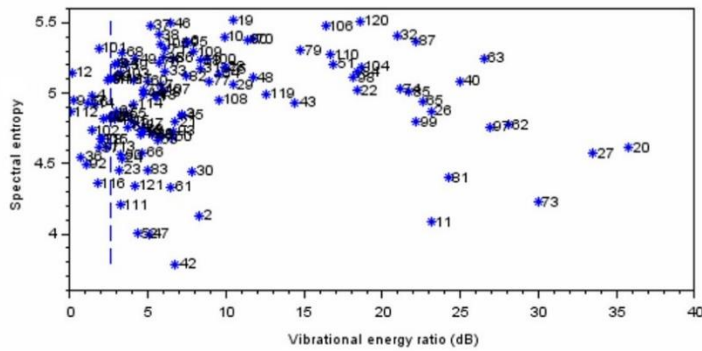


図 3.5.1.6 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

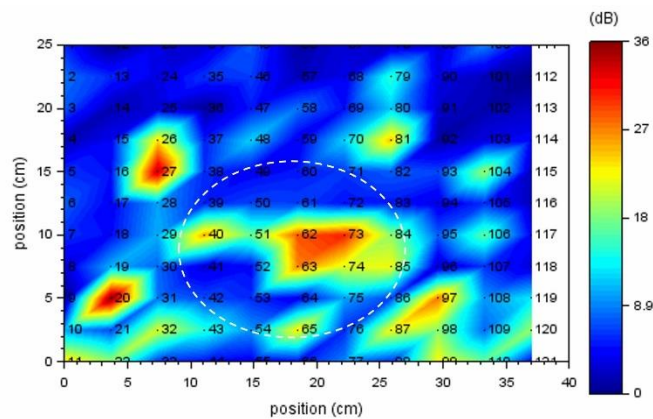


図 3.5.1.7 振動エネルギー比による映像結果例

埋設物の反応も入っているものの飛行時にはロータ風の影響で、周囲のノイズも発生していることが分かる (白破線円は埋設物の想定位置を示す)。

(実験結果例 3・・・UAV 飛行時 2)

同じ場所で再度、UAV を飛行させて音波照射させた場合の結果例を示す。図 3.5.1.8 は深さ 50 mm に埋設した 180 mm ホーロー容器計測時のスキャンエリアである。



図 3.5.1.8 スキャンエリア図 (11×11=121points)

計測点数は 121 (=11×11) ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.5.1.9 に、振動エネルギー比分布図を図 3.5.1.10 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用いた。音圧は約 93 dB である。

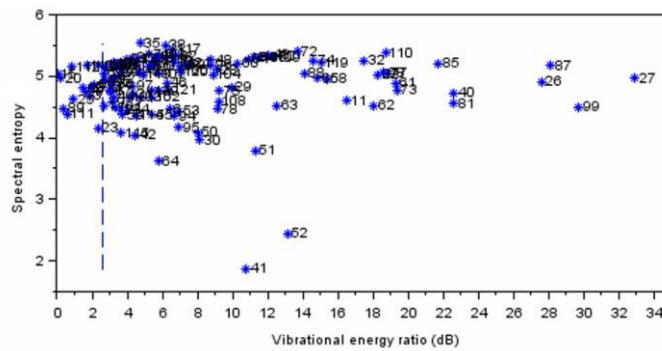


図 3.5.1.9 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

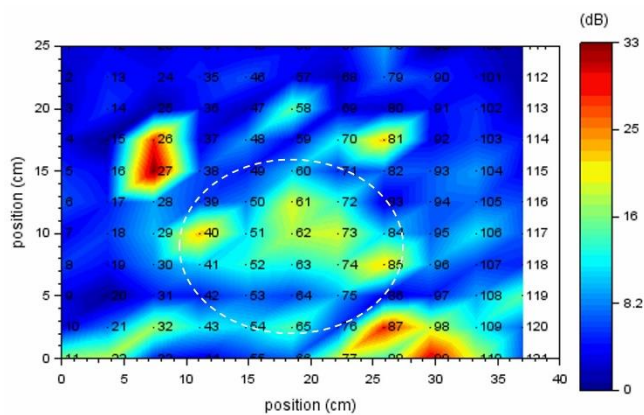


図 3.5.1.10 振動エネルギー比による映像結果例

前回同様に、埋設物の反応も入っているものの飛行時にはペラの影響で、周囲にもノイズが発生していることが分かる（白破線円は埋設物の想定位置を示す）。

(実験結果例 4・・・UAV 飛行時 3 FFT ドメイン)

同様な実験を、S/N 比改善のために SLDV 側データ取得を TIME ドメインから FFT ドメインに切り替えて 5 回アベレージにして再度実施した。図 3.5.1.11 は計測時のスキャンエリアである。計測点数は 121 (=11×11) ポイントである。振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図を図 3.5.1.12 に、振動エネルギー比による映像結果例を図 3.5.1.13 に示す。送信音波としては 50-300 Hz のマルチトーンバースト波を用いた。音圧は約 93 dB である。



図 3.5.1.11 スキャンエリア図 (11×11=121points)

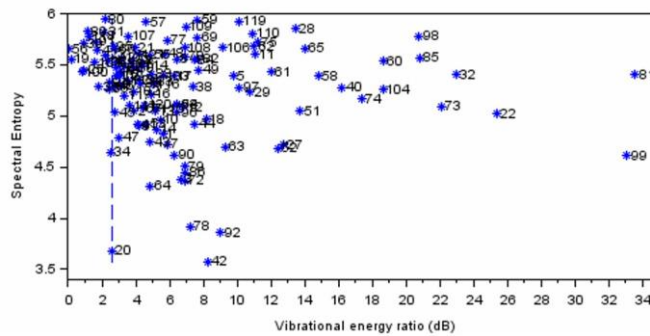


図 3.5.1.12 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーの分布図

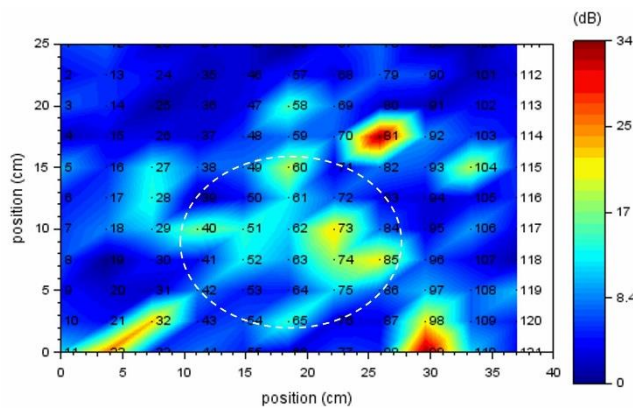


図 3.5.1.13 振動エネルギー比による映像結果例

5 回アベレージをかけても、全体的な印象は変わらないことがわかる。これは飛行時のロータによる影響により、揺れやすい小石等は常に振動していることが考えられる。



## (振動速度スペクトル比較)

実験結果例 1~4 における欠陥部および健全部の振動速度スペクトルの比較結果を図 3.5.1.14~図 3.5.1.17 に示す。各実験の計測設定を表 3.5.1.1 に示す (STNB および MTNB はシングルトーンバーストおよびマルチトーンバースト波の略称)。各図中における青色の線は埋設物上、橙色の線は埋設物が無い場所の結果である。これらを比べると、音源固定時は欠陥における一次の共振と思われる周波数帯を中心として、大きな反応が検出されている。しかし、UAV 飛行時の結果では埋設物の振動も検出されてはいるが、他の周波数帯でも大きな反応が検出されており、埋設物の反応が埋もれる形になっている。

表 3.5.1.1 各実験の計測設定

	加振波形	周波数範囲 (Hz)	計測状況	加算平均回数	データ取得モード
実験結果例 1	STNB	50-300	音源固定	5	Time
実験結果例 2	MTNB	50-300	UAV飛行	1	Time
実験結果例 3	MTNB	50-300	UAV飛行	1	Time
実験結果例 4	MTNB	50-300	UAV飛行	5	FFT

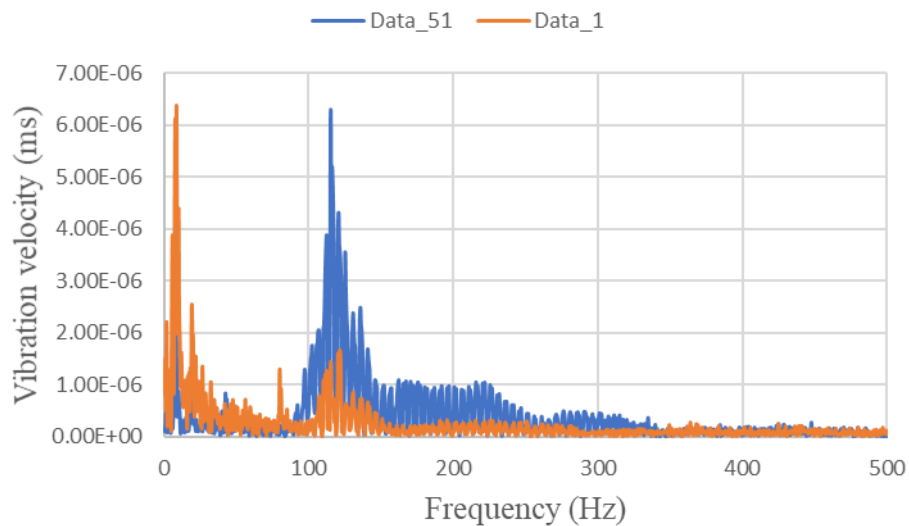


図 3.5.1.14 実験結果例 1 音源固定時 STNB

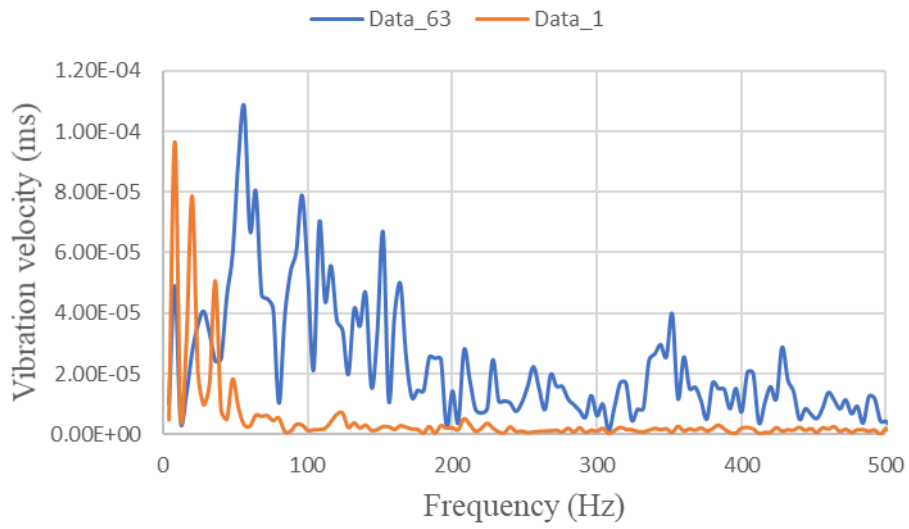


図 3.5.1.15 実験結果例 2 UAV 飛行時 MTNB

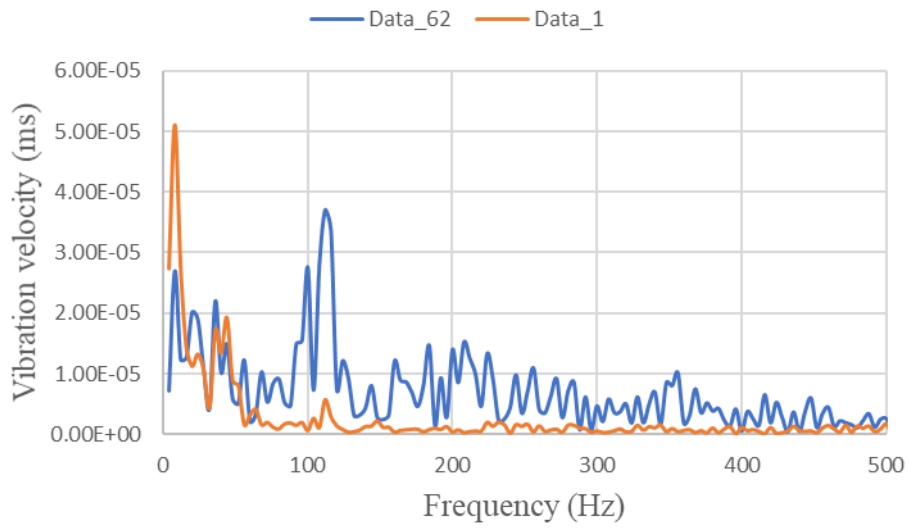


図 3.5.1.16 実験結果例 3 UAV 飛行時 MTNB

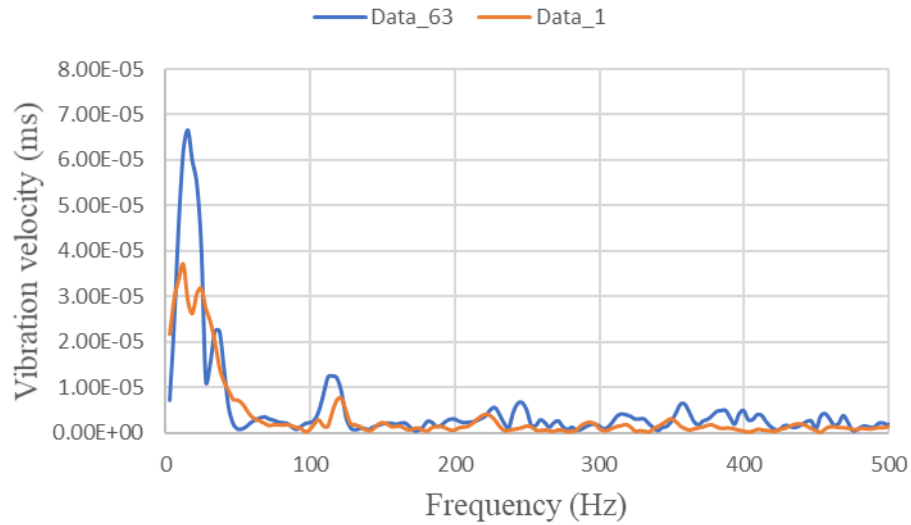


図 3.5.1.17 実験結果例 4 UAV 飛行時 FFT ドメイン MTNB

(まとめ)

厚木の佐藤工業(株)技術研究所の埋設物試験場(土壌はつくばの造成地の表層土(シルト))において、飛行中の UAV からの音波照射加振による直径 180 mm のホーロー容器(深さ 50 mm)を用いた探査実験を実施した。実験結果から、音源を固定した場合と比べると、埋設物の反応も得られているものの、周囲にノイズが発生してしまうことが判明した。これは、低空に滞空する UAV のロータからの風が直接、真下にある土壌面に当たることにより、地表面にある揺れやすい小石等も常時揺れてしまっていることが原因であると推測される。

これは UAV のロータからの風が原因であるので、計測時にはあえて滞空せずに、いったん着陸してロータの回転数を抑えた状態で計測することなどが対策として考えられる。

### 3.5.1.2 つくばの埋設物試験場 1 における基礎実験

#### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/03/06 のつくば市にある造成地において測定されたものである(土壌はつくばの表層土(シルト))。埋設物は直径 300 mm の中空プラポールベースとし、埋設深さは土壌表面から約 50 mm とした。実験セットアップを図 3.5.1.18 に示す。埋設物の直上の約 0.7~1 m 程度に音源搭載型 UAV を飛行させ、埋設物から約 4.1 m の離隔でレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra (Polytec Japan Corp.) を使用した。送信音波としては 100-600 Hz のマルチトーンバースト波を用い、音源から距離約 1 m の音圧を約 100 dB 程度とした。

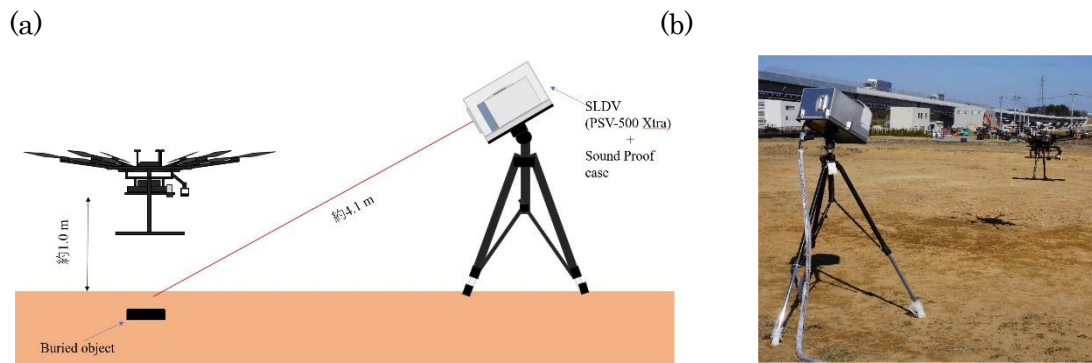


図 3.5.1.18 つくば市の造成地における UAV 飛行実験セットアップ図

(a) 実験セットアップ図、(b)実験時の写真

深さ 50 mm に埋設した中空プラポールベース計測時のスキャンエリアを図 3.5.1.19 に示す。

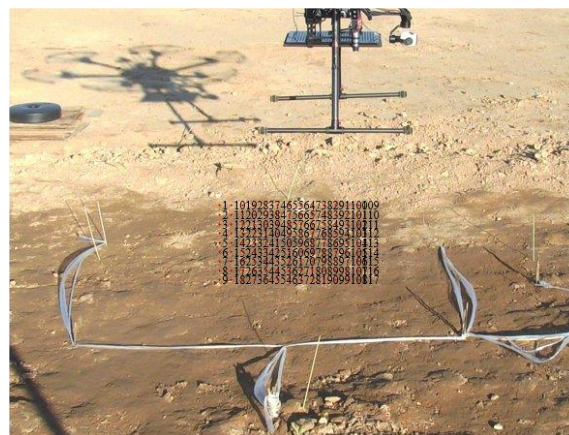


図 3.5.1.19 スキャンエリア図 (9×13=117points)

この場所では、周囲に障害物が無く、UAV の飛行には最適な場所であったが、同時に風を遮るものがほとんどないため、時折吹く強風により機体が大きく流されてしまうことがあった。そのため、風が弱まった瞬間を狙った高速計測を 5 回行って、後で振動エネルギー値の平均をとることとした。計測結果例を図 3.5.1.20～3.5.1.24 に示す。

(実験結果例 1)

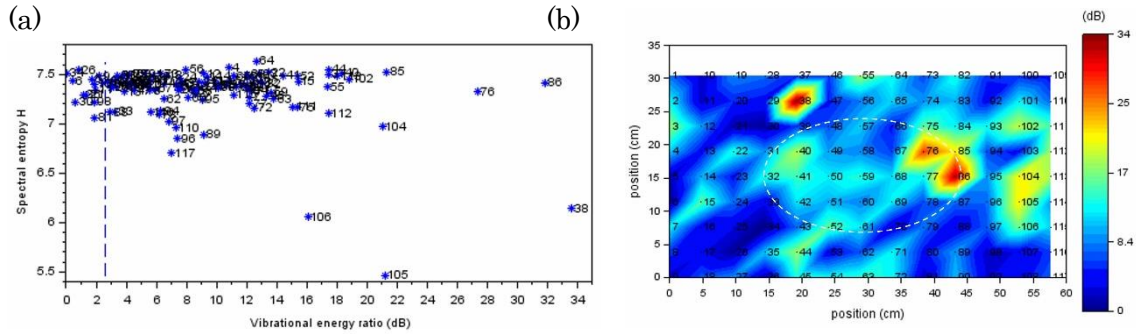


図 3.5.1.20 実験結果 1

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 2)

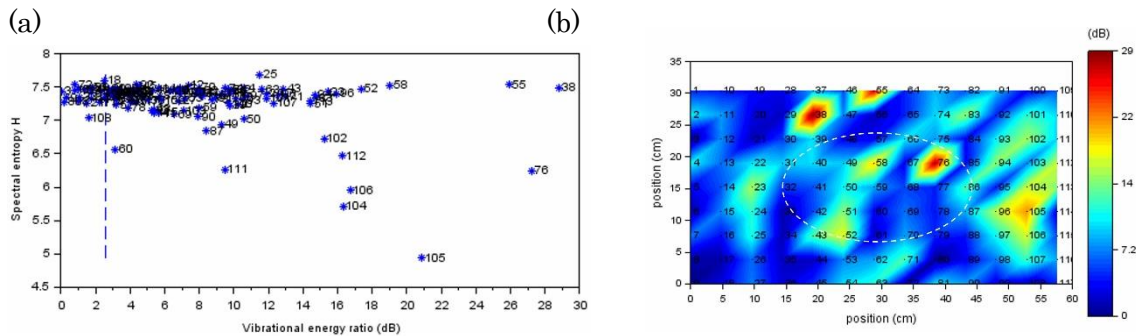


図 3.5.1.21 実験結果 2

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 3)

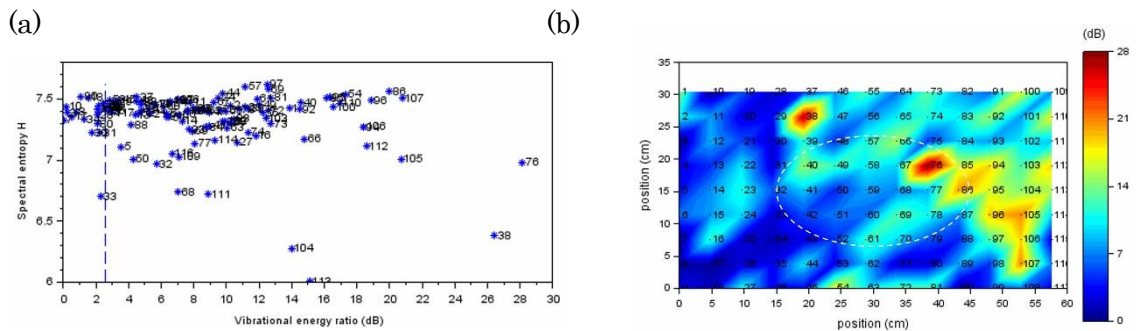


図 3.5.1.22 実験結果 3

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 4)

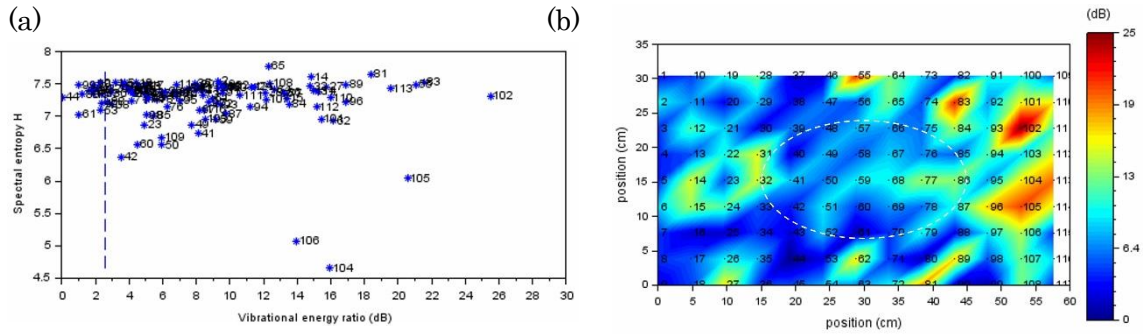


図 3.5.1.23 実験結果 4

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 5)

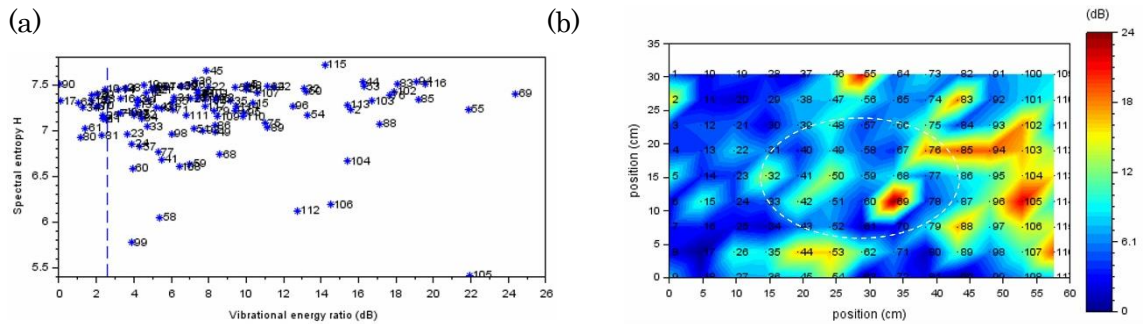


図 3.5.1.24 実験結果 5

(a) 振動エネルギー比とスペクトルエントロピー分布図, (b)振動エネルギー比分布図

(実験結果例 6・・・5 回分の平均)

上記 5 回分の計測結果より得られた振動エネルギーの平均値を用いて振動エネルギー比分布図を描いた場合の結果例を図 3.5.1.25 に示す (黒破線円は想定埋設位置)。

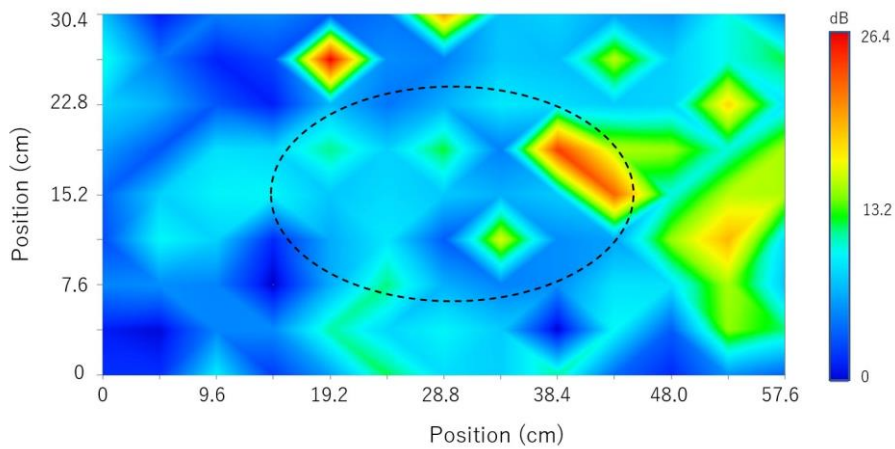


図 3.5.1.25 5 回分の振動エネルギー平均値より得られた振動エネルギー比分布図

図より、埋設物の反応も含まれているようであるが、真下に吹き付けるロータ風による影響により発生するノイズの影響が無視できないことがわかる。180 mm のホーロー容器の時も同様であったが、音源固定時には問題なく検出できていたことを考え合わせると、このロータ風による影響の低減方法を将来的には検討する必要があると思われる。

#### (まとめ)

UAV を飛行させながら音波照射加振を加えた場合の実験結果から、現状では、ロータからの風の影響により、浅層埋設物の反応が明瞭に得られない場合があることが判明した。地表面に存在する揺れやすい小石等と、地中内の埋設物の振動は時間的には分離できる可能性があるものの、以降の実験では、UAV は着陸状態で計測することとした。着陸状態による計測であったとしても、音源位置を自由に変更できるという利点は失われておらず、むしろ、音源位置の変動が無くなるために計測結果が安定するほか、バッテリーの消耗も少なくなるために、広範囲の探査には適していると思われる。



(実験時参考写真 B:つくば市の埋設物試験場 1 における UAV 飛行実験,2020 年 3 月 6 日)

### 3.5.2 UAV 着陸時の基礎実験

#### (実験セットアップ)

以下の測定データは 2020/02/18 の佐藤工業(厚木)の埋設物試験場で測定されたものである。ただし、土壌としてはつくばの造成地における表層土(シルト)を用いている。埋設物は直径 180 mm のホーロー容器とし、埋設した深さは土壌表面から約 20 mm, 50 mm とした。実験セットアップを図 3.5.2.1 に示す。埋設物の直上の約 0.75 m に音源を設置し、約 1.5 m にレーザドップラ振動計を設置した。測定方法は音源から音波を土壌に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面スピーカー(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500Xtra を使用した。また、測定前には、土の上に板と砂利を詰めた袋を置いて加圧を行っている(約  $2 \times 1 \text{ m}^2$  のコンパネ板 2 枚に、土嚢袋  $5 \text{ kg} \times 24$  個を乗せた)。

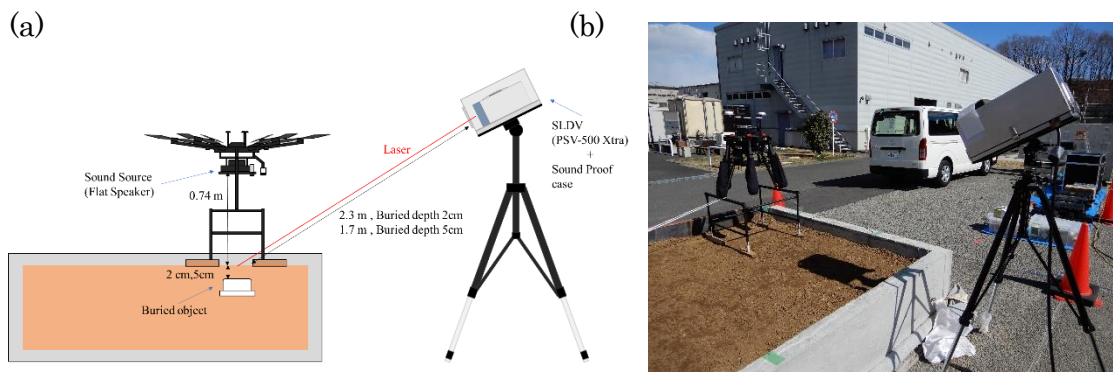


図 3.5.2.1 実験セットアップ

(a)実験セットアップ図、(b)実験風景

測定に使用した音波はマルチトーンバースト波を使用した。トーンバースト波のパラメータは周波数範囲 100~600 Hz、変調周波数 25 Hz、パルス幅 20 ms、波形の長さは 448 ms である。測定対象の表面付近での最大音圧は約 103 dB である。図 3.5.2.2 に波形例を示す

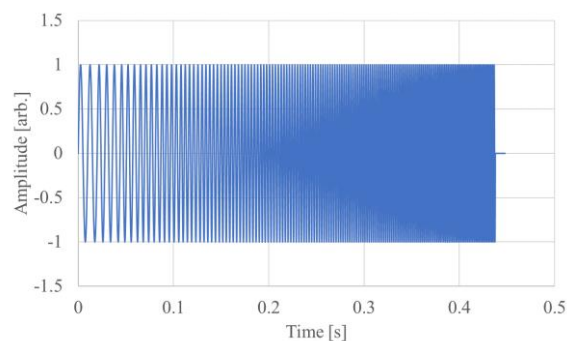


図 3.5.2.2 送信波形例



また、図 3.5.2.3 に測定エリアを示し、表 3.5.2.1 に測定点数と測定点間隔を示す。

(a)



(b)



図 3.5.2.3 測定エリア

(a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

表 3.5.2.1 測定点数と測定点間隔

Buried depth [cm]	Measurement Points	Distance between measurement points	
		Horizontal [cm]	Vertical [cm]
2	117 (9×13)	2.1	1.1
5	117 (9×13)	3	1.5

## (実験結果・・・直径 100 mm ホーロー容器)

図 3.5.2.4 に振動エネルギー分布を示す。積分範囲は 50~300 Hz であり、照射音波の帯域と同じ帯域とした。カラースケールは各測定場所の最大最小値となっている。

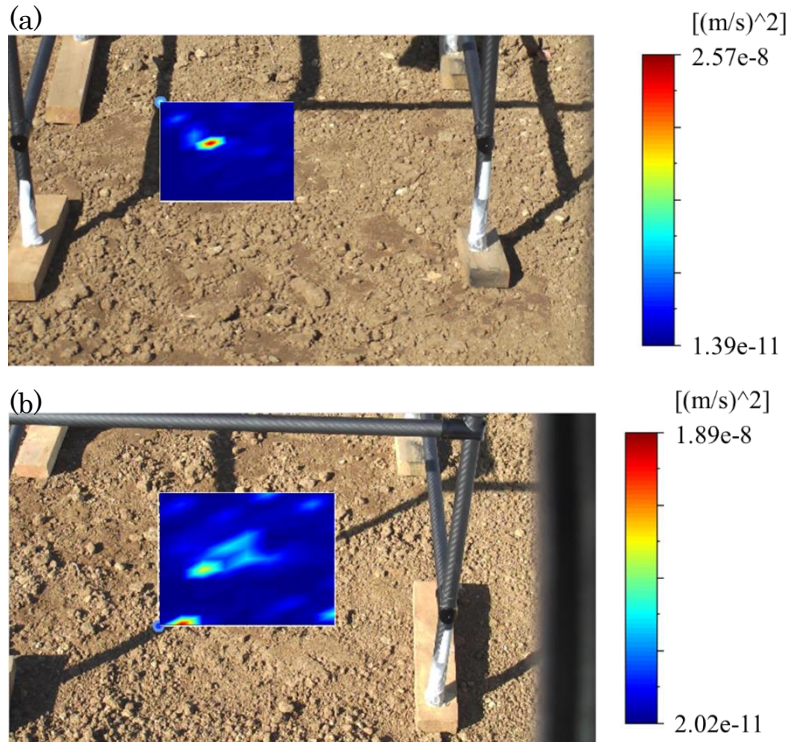


図 3.5.2.4 振動エネルギー分布  
(a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

図 3.5.2.4 より埋設深さ 20 mm と 50 mm の振動エネルギー分布中に突出して高い値を示す測定点がある。埋設深さ 50 mm は中心付近に埋設物と思われる分布があるため、メディアアンフィルタ処理後の結果を図 3.5.2.5 に示す。

図 3.5.2.5 より、埋設深さ 20 mm と 50 mm とともに振動エネルギー分布の中心付近に周囲より振動エネルギーの値が高く、それらの測定点が隣接・密集している事が確認出来る。次に、埋設深さ毎の振動エネルギーを比較したグラフを図 3.5.2.6 に示す。

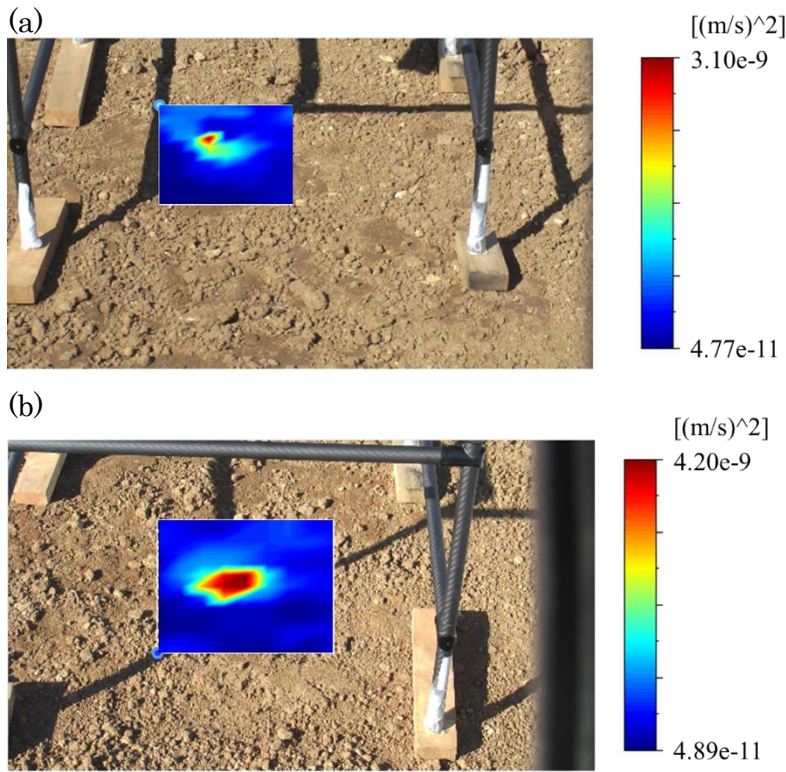


図 3.5.2.5 振動エネルギー分布(メディアンフィルタ適応後)  
 (a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

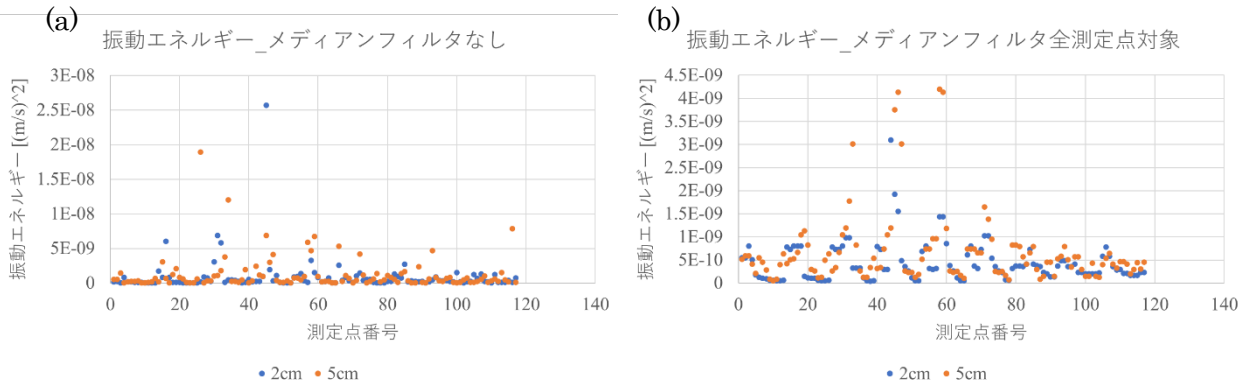


図 3.5.2.6 振動エネルギー比較  
 (a)メディアンフィルタなし、(b)メディアンフィルタ適応後

図 3.5.2.6 より、埋設物上ではない測定点の振動エネルギーの値が約  $1.5 \times 10^{-9} \text{ (m/s)}^2$  以下に集中している事が確認出来る。埋設深さ 2cm,5cm とともに  $1.5 \times 10^{-9} \text{ (m/s)}^2$  以上の値を示す測定点が多いことから、検出が出来る可能性はあると思われる。次に、図 3.5.2.5 の埋設深さ毎の振動エネルギー分布のカラースケールの最大最小値を同じ値にした結果を図 3.5.2.7 に示す。

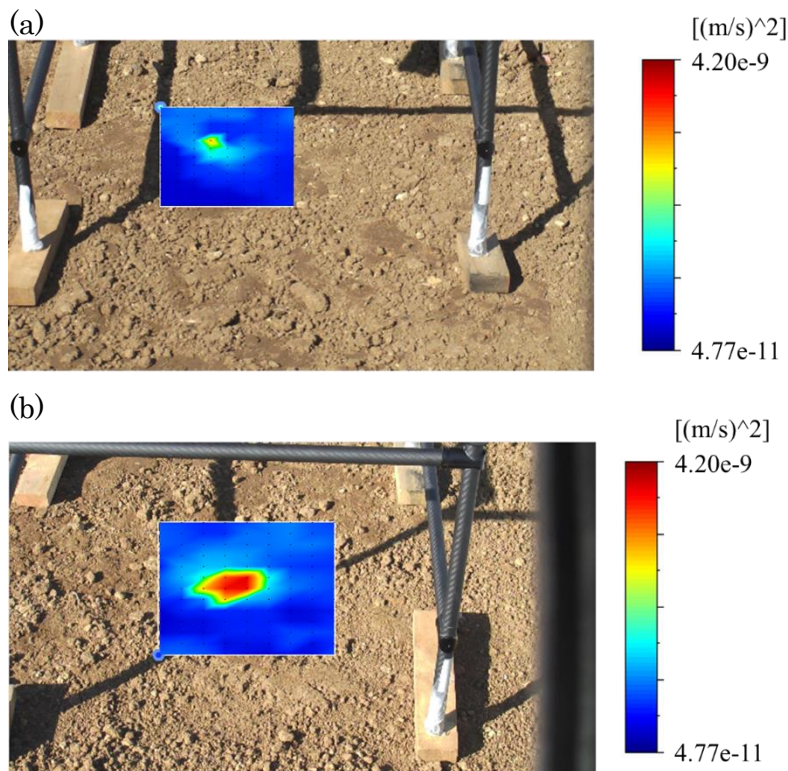


図 3.5.2.7 メディアンフィルタ適応後の振動エネルギー分布 (カラースケール統一後)  
(a)埋設深さ 20 mm、(b) 埋設深さ 50 mm

図 3.5.2.7 より、埋設深さ 50 mm が 20 mm より振動エネルギーが大きくなっているが、これはメディアンフィルタにより埋設深さ 20 mm の最も振動エネルギーが大きかった測定点が中央値に変換された事が要因である。図 3.5.2.7 の各埋設部上と思われる測定点中で最大値を示している箇所を比較すると約 8.5 倍の振動エネルギー差がある。このように埋設物が関係する振動エネルギーが高い値を示す測定点が隣接・密集していない場合はメディアンフィルタの使用には注意が必要である。

#### (まとめ)

実験結果から、直径 180 mm の場合は、深さ 100 mm ぐらいまでは検出可能であることが確認できた。同様に直径 100 mm の場合は、深さ 50 mm ぐらいまでは検出可能であることが確認できた。また、音波照射加振の場合、地表面にある小石等がノイズ源となる場合があるが、メディアンフィルタを適用することにより改善できる場合があることが明らかになった。

### 3.5.3 UAV 改良による効果

2021/02/24~26 に佐藤工業の埋設物試験場に埋設した 300 mm ポールベース (深さ 50 mm) を非接触で測定を行った。この実験では以下の条件で測定を行った(図 3.5.3.1 参照)。

- ・音源台に平面音源を固定して使用する。
- ・UAV に搭載している平面音源(音源振動対策有:フリーマウント)を使用する。
- ・UAV に搭載している平面音源(音源振動対策無:リジッドマウント)を使用する。

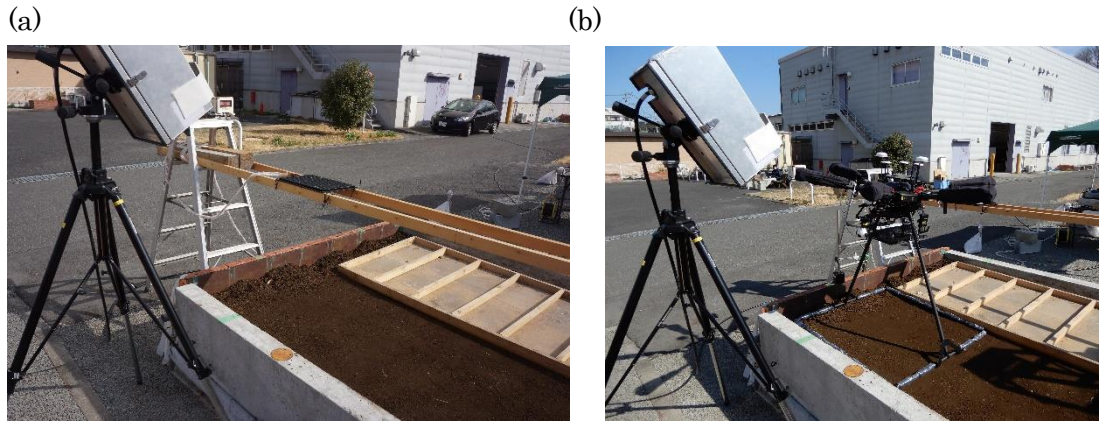


図 3.5.3.1 実験風景

(a)音源台を使用時、(b)UAV 搭載音源を使用時

#### (実験セットアップ)

この実験に使用した埋設物は直径 300 mm のポールベースである。実験セットアップを図 3.5.3.2 に示す。測定エリア中央から約 1.4 m の位置にレーザドップラ振動計を設置し、音源は測定エリアの直上約 0.7 m にあるものとする。測定方法は音源から音波を土壤に向け照射し、音波により励振された土壌表面の振動をレーザドップラ振動計により測定する方法である。使用した音源は平面音源(FPS INC, FPS2030M3P1R)であり、レーザドップラ振動計は PSV-500 Xtra を使用した。

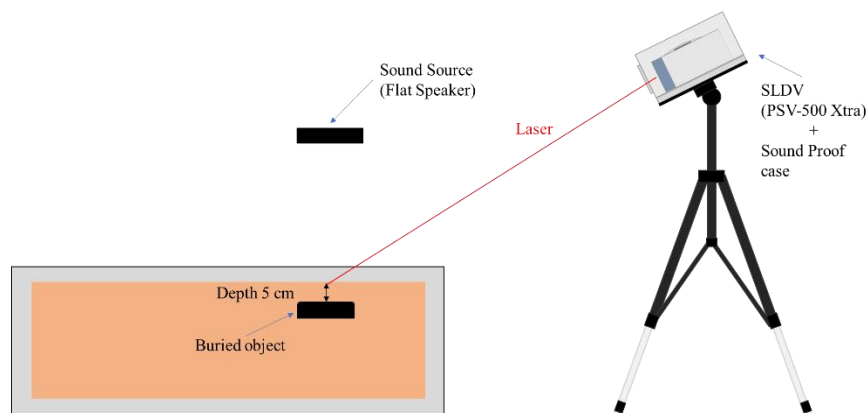


図 3.5.3.2 実験セットアップ図

**(測定結果 1：音源台使用時)**

図 3.5.3.3 に測定エリアを示す。測定点数は 99 点(縦 9×横 11 points)とし、測定点間隔は縦 4.87 cm、横 6.37 cm である。測定エリア中央に直径 30 cm の紙を置き、測定点密度の調整を行った。また、音源の設置条件にかかわらず測定エリアは全て同じ設定で行った。なお、送信波形は 50-152Hz のシングルトーンバースト波を用いた。

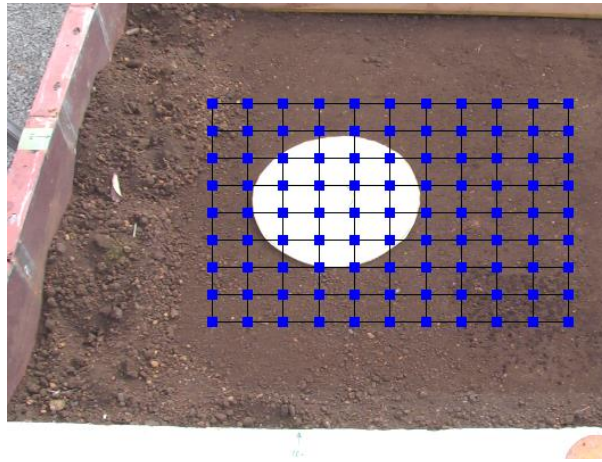
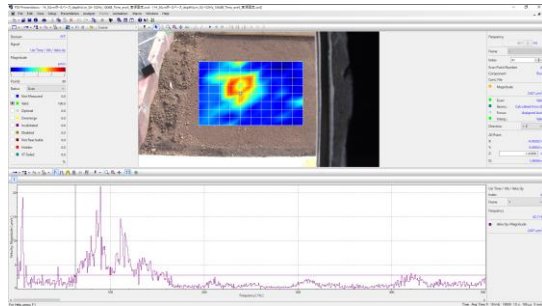


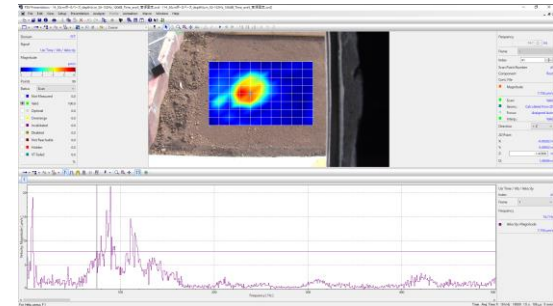
図 3.5.3.3 測定エリア

次に、図 3.5.3.4 に音源台使用時の振動速度スペクトルと振動速度分布を示す。

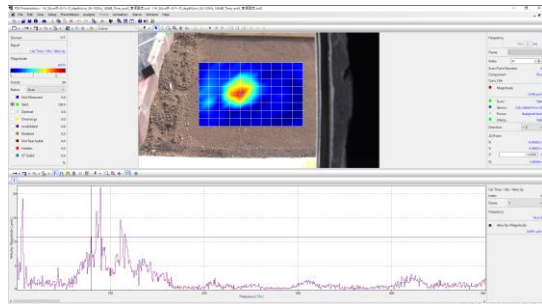
(a)62.7 Hz



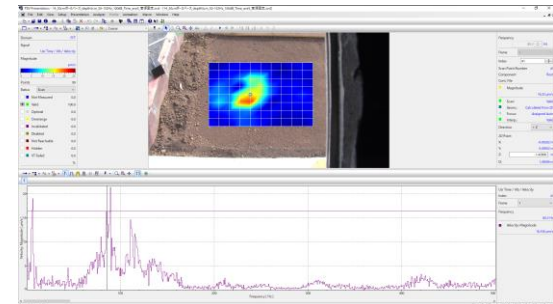
(b)74.7 Hz



(c)79.3 Hz



(d)85.3 Hz



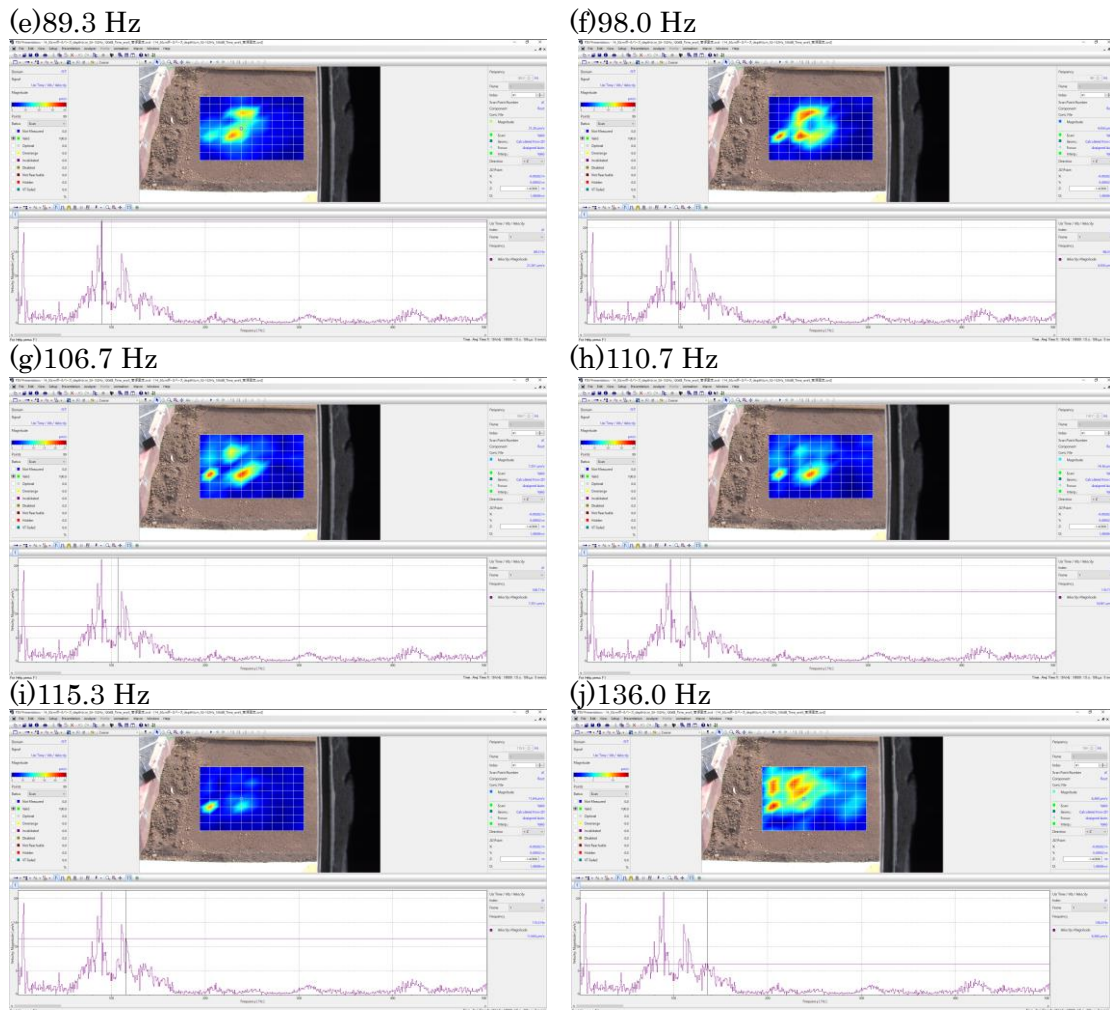


図 3.5.3.4 振動速度分布と振動速度スペクトル (Index 41)  
 (a)62.7 Hz、(b)74.7 Hz、(c)79.3 Hz、(d)85.3 Hz、(e)89.3 Hz、  
 (f)98.0 Hz、(g)106.7 Hz、(h)110.7 Hz、(i)115.3 Hz、(j)136.0 Hz

図 3.5.3.4 より、62.7 Hz~136.0 Hz まで埋設物の形状に似た分布が確認できる。次に振動エネルギー分布を図 3.5.3.5 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域と同じである。

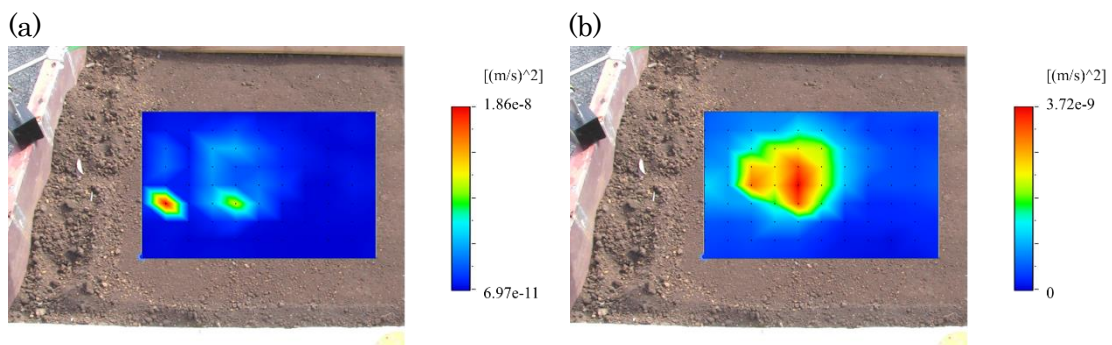


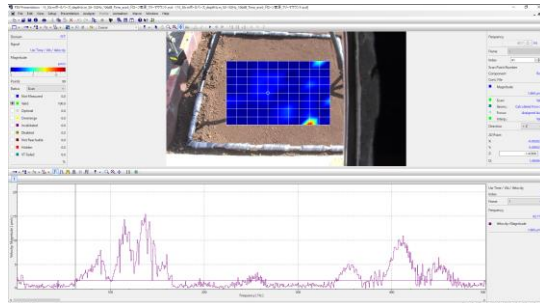
図 3.5.3.5 振動エネルギー分布  
 (a)音源台使用、(b)メディアンフィルタ適応後

図 3.5.3.5(a)より振動エネルギーが高い場所が数点点在し、測定エリア中央付近に振動エネルギーがやや高く密集している分布が確認出来る。そのため、メディアンフィルタを適応したところ図 3.5.3.5(b)のように埋設物と似た形状で振動エネルギーの高い測定データが密集している分布が確認された。

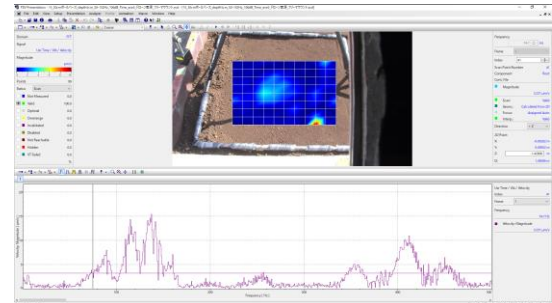
**(測定結果 2 : UAV 搭載音源を使用時)**

測定エリアは前節と同じである。図 3.5.3.6 に UAV 搭載音源使用時(音源振動対策有：フリーマウント)の振動速度スペクトルと振動速度分布を示す。

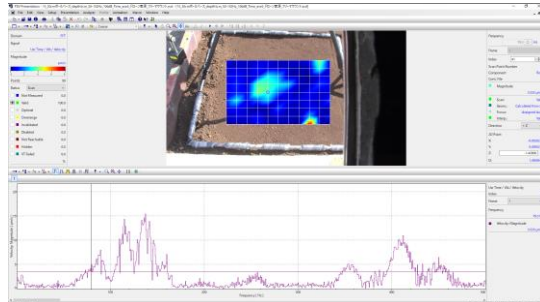
(a)62.7 Hz



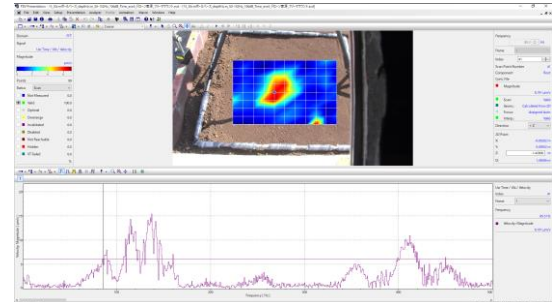
(b)74.7 Hz



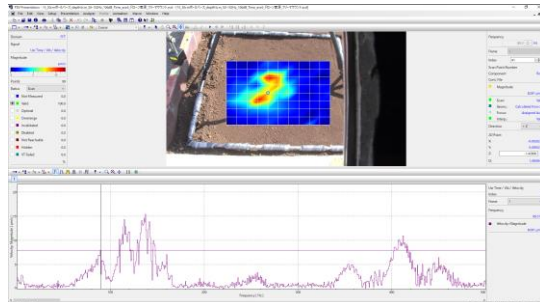
(c)79.3 Hz



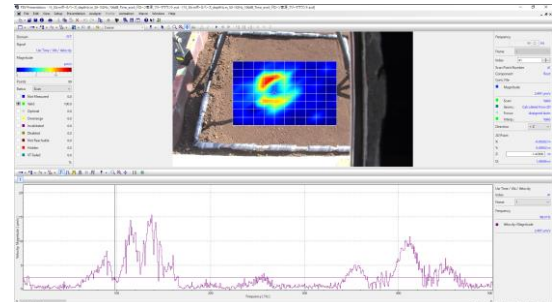
(d)85.3 Hz



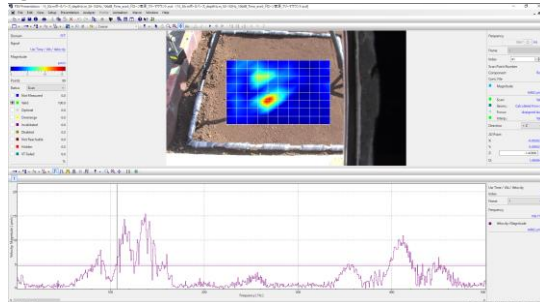
(e)89.3 Hz



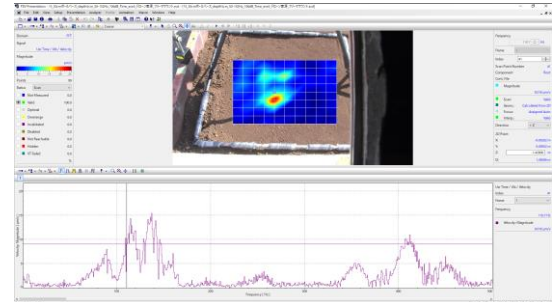
(f)98.0 Hz



(g)106.7 Hz



(h)110.7 Hz





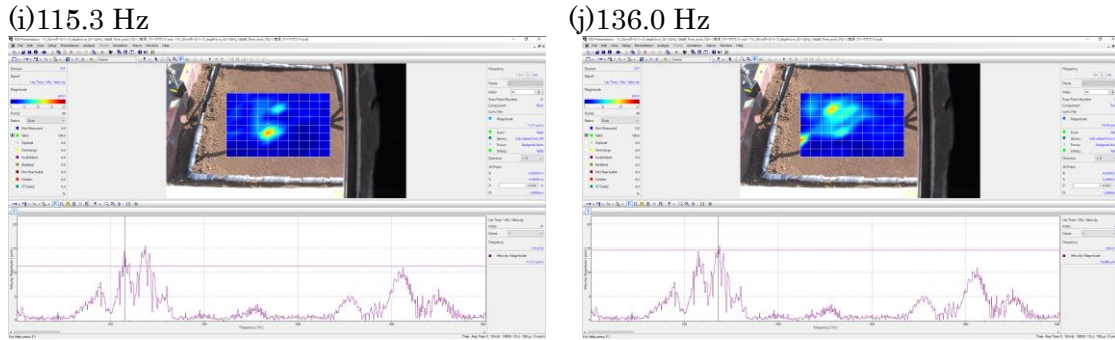


図 3.5.3.6 振動速度分布と振動速度スペクトル (Index 41)  
 (a)62.7 Hz、(b)74.7 Hz、(c)79.3 Hz、(d)85.3 Hz、(e)89.3 Hz、  
 (f)98.0 Hz、(g)106.7 Hz、(h)110.7 Hz、(i)115.3 Hz、(j)136.0 Hz

図 3.5.3.6 より、62.7 Hz~136.0 Hz まで埋設物の形状に似た分布が確認できる。次に振動エネルギー分布を図 3.5.3.7 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域(50 Hz~152 Hz)と同じとした。

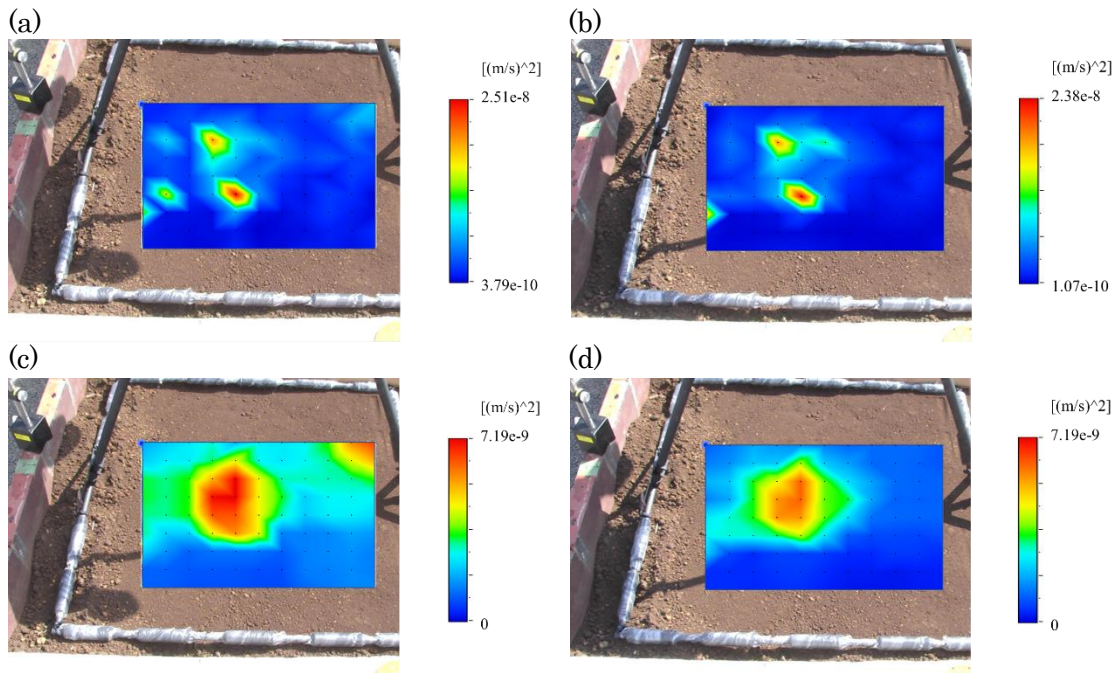


図 3.5.3.7 振動エネルギー分布

- (a)音源振動対策無 (リジッドマウント)、(b) 音源振動対策有 (フリーマウント)、  
 (c)音源振動対策無 (リジッドマウント) +メディアンフィルタ適応、  
 (d) 音源振動対策有 (フリーマウント) +メディアンフィルタ適応

図 3.5.3.7(a)(b)より振動エネルギーが高い場所が数点点在し、測定エリア中央付近に振動エ

エネルギーの値がやや高く密集している分布が確認出来る。そのため、メディアンフィルタを適応したところ図 3.5.3.7(c)(d)のように埋設物と似た形状で振動エネルギーの高い測定データが密集している分布が確認された。また、振動対策無しのデータは測定エリア右上付近において振動エネルギーの値が高いが、振動対策有りのデータでは周囲と変わらない値となっている。図 3.5.3.8 に測定エリア右上(Index 91)の振動速度スペクトルを示す。

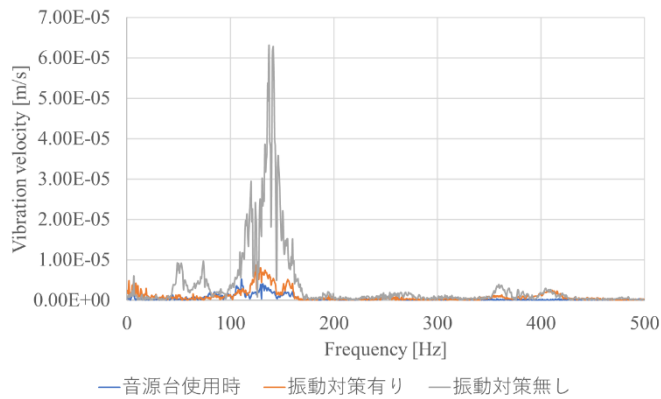


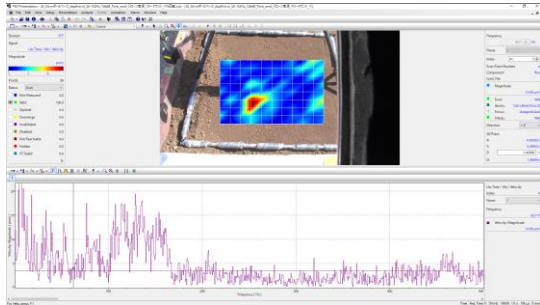
図 3.5.3.8 音源振動対策の有無における振動速度スペクトル

図 3.5.3.8 より音源から UAV 本体に伝わる振動の対策をする事によって、地表面に伝わる振動を抑制出来ている事がわかる。

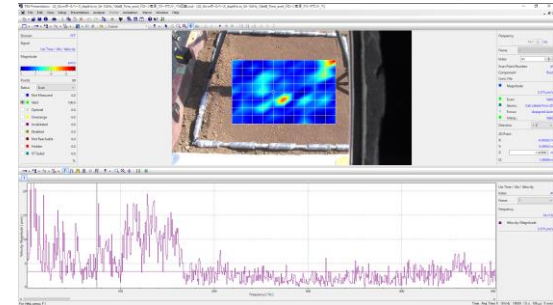
### (測定結果 3 : UAV 搭載音源を使用時、プロペラ回転時)

測定エリアの説明は上記と同じ場所を測定したので割愛する。図 3.5.3.9 にプロペラを回転させた状態でド UAV 搭載音源を使用時(音源振動対策有り)の振動速度スペクトルと振動速度分布を示す。

(a)62.7 Hz



(b)74.7 Hz



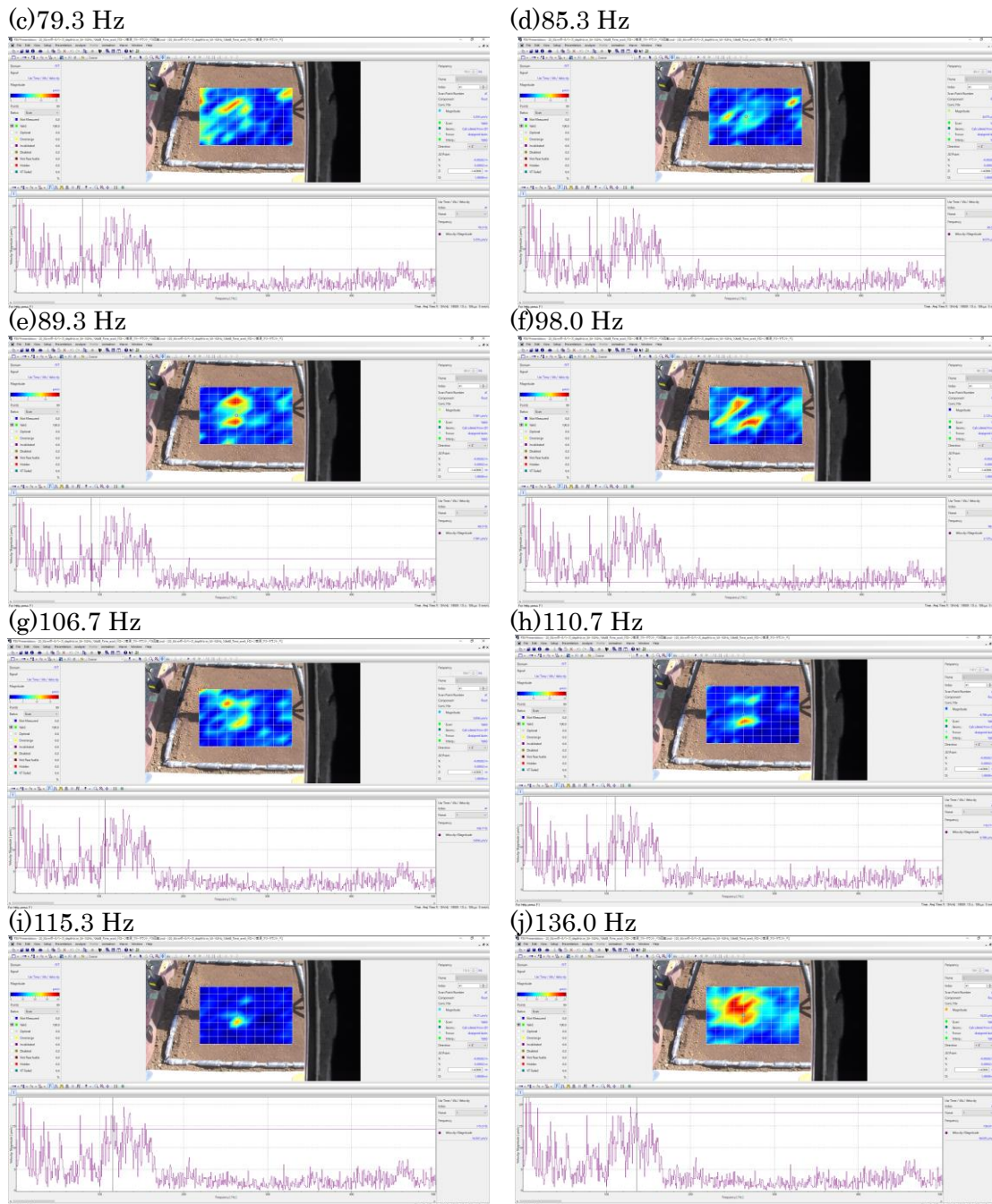


図 3.5.3.9 振動速度分布と振動速度スペクトル (Index 41)  
 (a)62.7 Hz、(b)74.7 Hz、(c)79.3 Hz、(d)85.3 Hz、(e)89.3 Hz、  
 (f)98.0 Hz、(g)106.7 Hz、(h)110.7 Hz、(i)115.3 Hz、(j)136.0 Hz

図 3.5.3.9 より、136.0 Hz において埋設物に似た形状の振動速度分布が確認出来る。ただし、それ以外の周波数では不明瞭な印象を受ける。次に振動エネルギー分布を図 3.5.3.10 に示す。計算範囲は送信波形の周波数帯域(50 Hz～152 Hz)と同じとした。

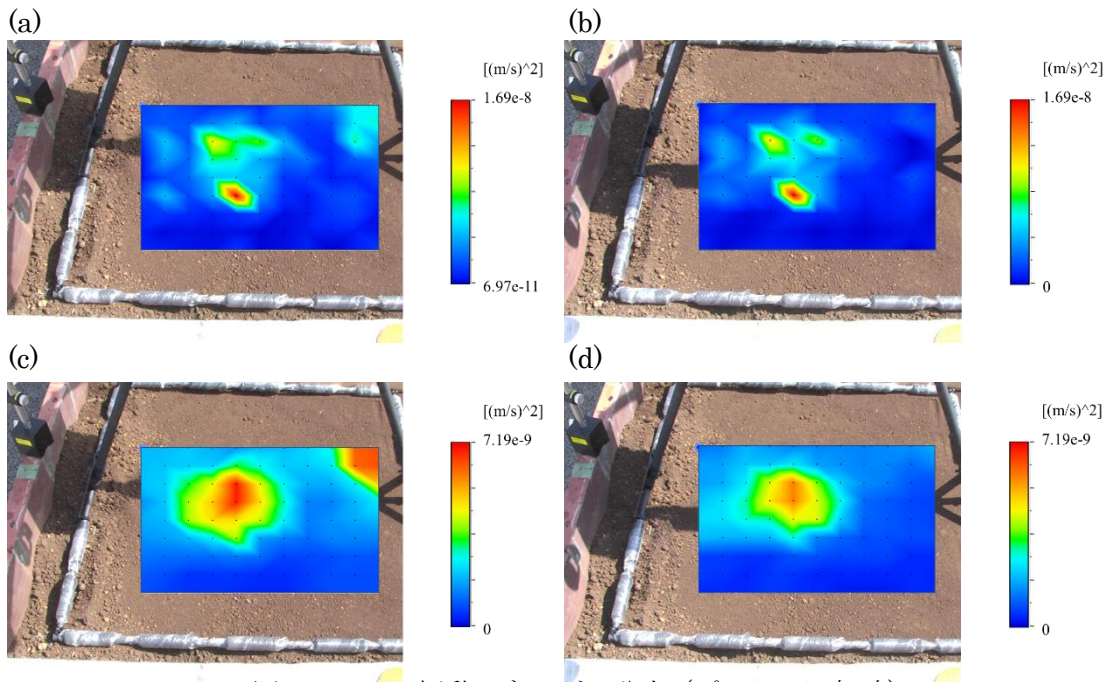


図 3.5.3.10 振動エネルギー分布 (プロペラ回転時)

- (a)音源振動対策無し、(b) 音源振動対策有り、  
 (c)音源振動対策無し+メディアフィルタ適応、  
 (d) 音源振動対策有り+メディアフィルタ適応

図 3.5.3.10 よりメディアフィルタを適応する事で、埋設物と似た形状で振動エネルギーの高い測定データが密集している分布が確認された。プロペラを回転させていないデータ(図 3.5.3.7)と比較すると微妙に分布に差異があるが、埋設物の大まかな位置の推定には影響しないようである。測定終了後、埋設物の位置と測定結果を比較するため、表層の土を掘り返した。掘り返す前に測定点の4隅に竹串を刺し、直上から撮影を行った。

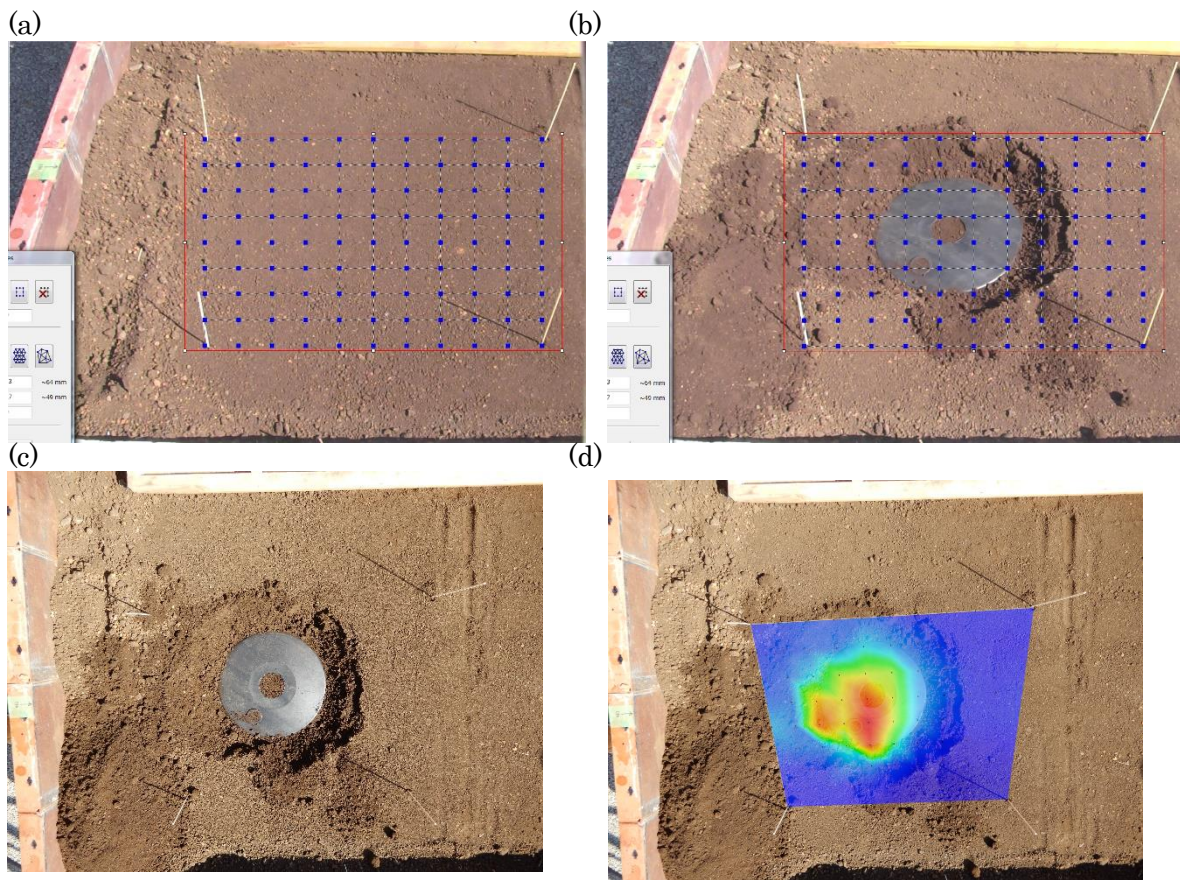


図 3.5.3.11 埋設物位置

(a)竹串の挿入位置、(b)表層土を掘り返した写真、(c)埋設物直上からの写真、  
(d)音源台を使用したデータの振動エネルギー分布

図 3.5.3.11 より埋設物と振動エネルギーが高い値を示す場所はほぼ一致している事がわかる。

#### (まとめ)

2021/02/24~26 に佐藤工業の埋設物試験場に埋設した 300 mm ポールベース (深さ 50 mm) を非接触で測定を行い解析した。振動エネルギー分布から UAV に搭載されている音源の振動対策の有無の差が確認された。また、地面に UAV が接地している時にプロペラ (ロータ) がアイドリング程度の回転であれば、探査結果にあまり影響しない事も確認された。

### 3.5.3 まとめ

飛行中の UAV からの音波照射加振を試みた結果、低空のホバリング状態では、ロータからの風の影響により、浅層埋設物の反応が明瞭に得られない場合があることが判明した。そこで、UAV 着陸状態での計測を行ったところ、今度は音源の振動が着陸脚部を通じて地

面に伝搬して、計測結果に影響することが明らかになった。そこで、音源マウント方法や着陸脚の改良を施すことにより、音源を空中に配置した場合と同等の結果が得られることが確認された。また、アイドリング程度のロータ回転であれば、探査結果にはあまり影響しないことも明らかになった。なお、着陸状態による計測であったとしても、音源位置を自由に変更できるという本手法の持つ本質的な利点は失われておらず、むしろ、音源位置の変動が無くなるために計測結果が安定するほか、バッテリーの消耗も少なくなるために、広範囲の探査には適していると思われる。



(実験時参考写真 C：厚木の埋設物試験場における UAV 着陸時計測 2021 年 2 月 25 日)

## 4. 委託業務全体の成果

### 4.1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

計画時には UAV からの音波照射加振は、飛行中は位置精度の問題で難しくとも計測領域の上に着陸してしまえば、問題なく実施できるはずであると想定していた。しかしながら、実験結果から、着陸脚からの振動が結果に悪影響を及ぼすことが明らかになった。この振動は音源自体から発生しており、UAV 本体に音源を直接取り付けていたのが原因であった。そこで、音源はバネを介したフリーマウントとし、着陸脚もカーボン製の大型のものへと改良した。その結果、UAV 着陸時でも問題なく探査が行えるようになることを確認した。また、着陸時には UAV のプロペラはアイドリング状態となるため、ほとんどバッテリーを消費しないという副次的効果も生まれた。このことは計測可能時間が長くとれることを意味している。

また、実は今回の報告書本文では触れていないが、LDV 側にも大きな進歩があった。それは Polytec 社の Qtac と呼ばれる技術であり、複数の検出器を搭載することで、従来問題となっていたノイズを低減させて S/N 比を向上させるという技術である。将来的には、この技術が搭載された SLDV が登場することが予測されるため、現在よりも高い S/N 比が実現

できるようになることが期待される（すなわち、感度が向上するため、より厳しい条件下でも探査可能になることを意味している）。

#### 4.2 研究課題の発展性（間接効果を含む）

今回の研究では、あくまでも基礎研究であるということから国内で簡単に手に入る埋設物として、近隣のホームセンターで手に入る中空円形容器を用いた。しかしながら、中空容器と内容物が入った容器では結果が異なる可能性がある。実際に探知したい埋設物に対する検討も将来的には必要であると考ええる。

#### 4.3 研究成果の発表・発信に関する活動

本研究は平成 30（2018）年 12 月に開始されたが、音源搭載型 UAV の導入は令和元(2019)年 9 月であったため、令和元(2019)年度は主として実験および計測データの検討のみを実施した。令和 2（2020）年度より、国内国際学会における発表活動を実施したが、新型コロナウイルスの影響により、すべてオンライン開催となっている。しかしながら、オンライン開催による利点もあり、ほぼ同じ期間に開催された複数の学会において参加発表を行うことができた。

## 5 プロジェクトの総合的推進

### 5.1 研究実施体制とマネジメント

令和 2 年度は新型コロナによる影響により、学外における探査実験が 8 月まで実施できなかった他、参加を予定していた学会も中止もしくはオンライン発表となる状況であった。特に緊急事態宣言が出されていた 4 月は、研究スタッフの集まりも十分ではなかったこともあり、令和元年度の研究報告書の提出締め切り自体も 1 か月ほど延長して頂いて対応した。しかしながら、5 月以降は、研究スタッフに在宅ワークでのデータ処理を認めると共に研究 Meeting も Meet を用いたオンライン会議を利用することにしたことから、徐々に研究活動のペースを復活させることができた。

### 5.2 経費の効率的執行

前述のようにコロナ禍の影響で、参加を予定した学会の多くはオンライン発表となってしまったため、予定していた旅費の多くが使い切れない状況となった。しかしながら、2020 年 8 月および 10 月に実施した探査実験結果より、試作した音源搭載型 UAV の問題点（音源マウントおよび着陸脚）が明らかになったため、音源マウントおよび着陸脚の改良費として経費を効率的に使用した。

## 6 まとめ、今後の予定

### 6.1 本研究により得られた成果

本研究では、中空円形容器を埋設物として様々な種類の土壌（珪砂、関東ローム土、シルト土、赤土）において、UAV に搭載可能な平面音源からの音波照射加振を用いた浅層地中探査実験を行った。本研究により得られた成果を以下に列挙する。

・最初に珪砂の実験結果から、埋設物を検出する周波数は、埋設物の大きさには反比例するものの、深さを変化させても、あまり変わらないことが明らかになった。そのため、埋設物の深さを細かく変化させて検出周波数がどのように推移するのか実験してみたところ、地表面に近い場所ではたわみ共振に近い周波数で振動するものの、深くなるにつれて減少し、およそ深さ 20 mm 以降はほぼ一定となることが確認された。これは埋設状態における埋設物自体の振動が地表面で観測されていることを意味していると思われる。

・埋設物試験場において、様々な種類の土壌（関東ローム土、シルト土（つくばの表層土）、赤土（グラウンド土））を用いた実験結果から、埋設物の深さと大きさ（直径）毎の探査結果を表 6.1 に示す。図より、土壌の種類や状態（含水率や締固度）および音圧にも依存すると思われるが、検出可能な埋設物（中空容器の場合）の最大深さは、直径 300 mm のプラスチックベースで約 100~150 mm、直径 180 mm のホーロー容器で約 100 mm および直径 100 mm のホーロー容器で約 50 mm 程度であることが明らかになった。これは、探査可能な深度は、埋設物の直径のおよそ半分程度であることを意味している。

表 6.1 探査可能な深さと埋設物の大きさ（直径）

		直径 [mm]		
		100	180	300
深さ [mm]	150	○	×××	○△×
	100	○×	○○×	○○
	50	○△○	○	○
	20	○		

○珪砂    ○シルト    ○赤土    ○関東ローム

・関東ローム土を用いた実験では、遠距離からの計測を試み、LDV から埋設物までの距離が約 20 m であっても検出可能であることが明らかになった。ただし、この結果はレーザーヘッドの高さは約 2 m 時の結果であり、使用した LDV（赤外線レーザー 1550 nm, 10 mW）の性能を考えると、仮にレーザーヘッドの高さを約 10 m に設定できれば、土表面へのレーザーの入射角度は 20 m 時と変わらないため、100 m の離隔であっても、20m 離隔時と同様に検出可能であると思われる。この理由は、距離が増えて、レーザー光の照射面積が増えても、



その照射範囲内で最も強い反射光を放つ部分の信号が有効となるため、地表面への入射角が同じであれば、ドップラ効果により計測される振動速度自体には影響がないためである。

・地中探査用の音波照射加振波形については、コンクリート構造物の欠陥探査用のトーンバースト波を基本にして、計測速度を優先したインターバル時間を省略したマルチトーンバースト波、加振力を重視してパルス持続時間が長くしたシングルトーンバースト波が考案された。それぞれの特徴としては、前者は遠距離から高速にスキャンを行いたい場合に適しており、後者は比較的大きめの埋設物（直径 180~300 mm）を明確に検出したい場合に適しているといえる。

・浅層地中探査用に音源搭載型 UAV を試作した。音源としては主として積載重量の関係から平面音源(2.2 kg)を採用した。機体全体の重さは約 10 kg で、飛行可能時間は約 20 分程度である。飛行中の音源搭載型 UAV からの音波照射加振を試みた結果、低空のホバリング状態では、ロータからの風の影響により、浅層埋設物の反応が明瞭に得られない場合があることが判明した。そこで、UAV 着陸状態での計測を行ったところ、今度は音源の振動が着陸脚部を通じて地面に伝搬して、計測結果に影響することが明らかになった。そこで、音源マウント方法や着陸脚の改良を施すことにより、音源を空中に配置した場合と同等の探査結果が得られることが確認された。また、アイドリング程度のロータ回転であれば、探査結果にはあまり影響しないことも明らかになった。なお、着陸状態による計測であったとしても、音源位置を自由に変更できるという本手法の持つ本質的な利点は失われておらず、むしろ、音源位置の変動が無くなるために計測結果が安定するほか、バッテリーの消耗も少なくなるために、広範囲の探査には適していると思われる。

## 6.2 今後の予定

今回の研究結果により、埋設物として中空円形容器を用いた場合の音波照射加振による浅層地中探査に関する基礎特性が明らかになった。しかしながら、埋設物として、容器内に内容物がある場合には、重量も増加するために得られる反応が異なる場合が考えられる。そのため、研究予算次第であるが、容器内に内容物を入れた場合の検討も実施する必要があると考えている。

## 7. 研究発表、知的財産等の状況

### 7.1 研究発表等の状況

研究開始から終了までの全期間における研究発表等の状況を下表に示す。

種別	件数
学術論文	3件
学会発表	10件
展示・講演	1件
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

### 7.2 知的財産等の状況

該当なし

### 7.3 その他特記事項

該当なし

## 謝辞

本報告書の作成にあたって、赤外線レーザを搭載した SLDV 機材の貸し出しをしていたポリテックジャパン(株)の水谷哲哉氏に感謝いたします。



(実験時参考写真 D : 厚木の埋設物試験場における UAV 着陸時計測 2021 年 2 月 25 日)

## 参考文献

- 1) R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : Study on Non contact acoustic imaging method for concrete structures - Improvement of signal-to-noise ratio by using tone burst wave method, Proc. IEEE Int. Ultrasonic Symp. 2013, pp.1303-1306, (2013).
- 2) K.Katakura, R.Akamatsu, T.Sugimoto and N.Utagawa,” Study on detectable size and depth of defects in noncontact acoustic inspection method”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, (2014.6).
- 3) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda and K.Katakura,” Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, (2015.7).
- 4) 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 歌川紀之 : マルチトーンバースト波を用いた高速非接触音響探査法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, pp.2103-2108, (2016).
- 5) T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Utagawa, K.Katakura : High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 56, 07JC10, (2017).
- 6) 杉本恒美、杉本和子、歌川紀之、川上明彦: インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法,-マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証-, 平成 29 年度 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.149-154, (2017).
- 7) 杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳, 金子岳夫, 森岡宏之, 志岐仁成, 中川貴之 : 地下大空洞内の吹付けコンクリートに対する非接触音響探査法の適用性検討, トンネル工学報告集, 第 27 巻, I-8, pp.1-6, (2017).
- 8) 杉本恒美, 杉本和子, 黒田千歳, 森岡宏之 : 非接触音響探査法による吹付けコンクリートにおける欠陥検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1707- 1712, (2018).
- 9) 杉本恒美, 杉本和子, 上地樹, 歌川紀之, “外壁検査のための音源搭載型 UAV を用いた高速非接触音響探査法”, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1901-1906, (2019).
- 10) K.Sugimoto, R.Akamatsu, T.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda,” Detection of resonance frequency of both the internal defects of concrete and the laser head of a laser Doppler vibrometer by spatial spectral entropy for noncontact acoustic inspection”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.58, SGGB15, (2019).

# 付録

## A 陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性について

陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性図を下図に示す。この特性表を参考にして、2019年8月時の実験では含水率を約40%程度に調整した実験を行っている。

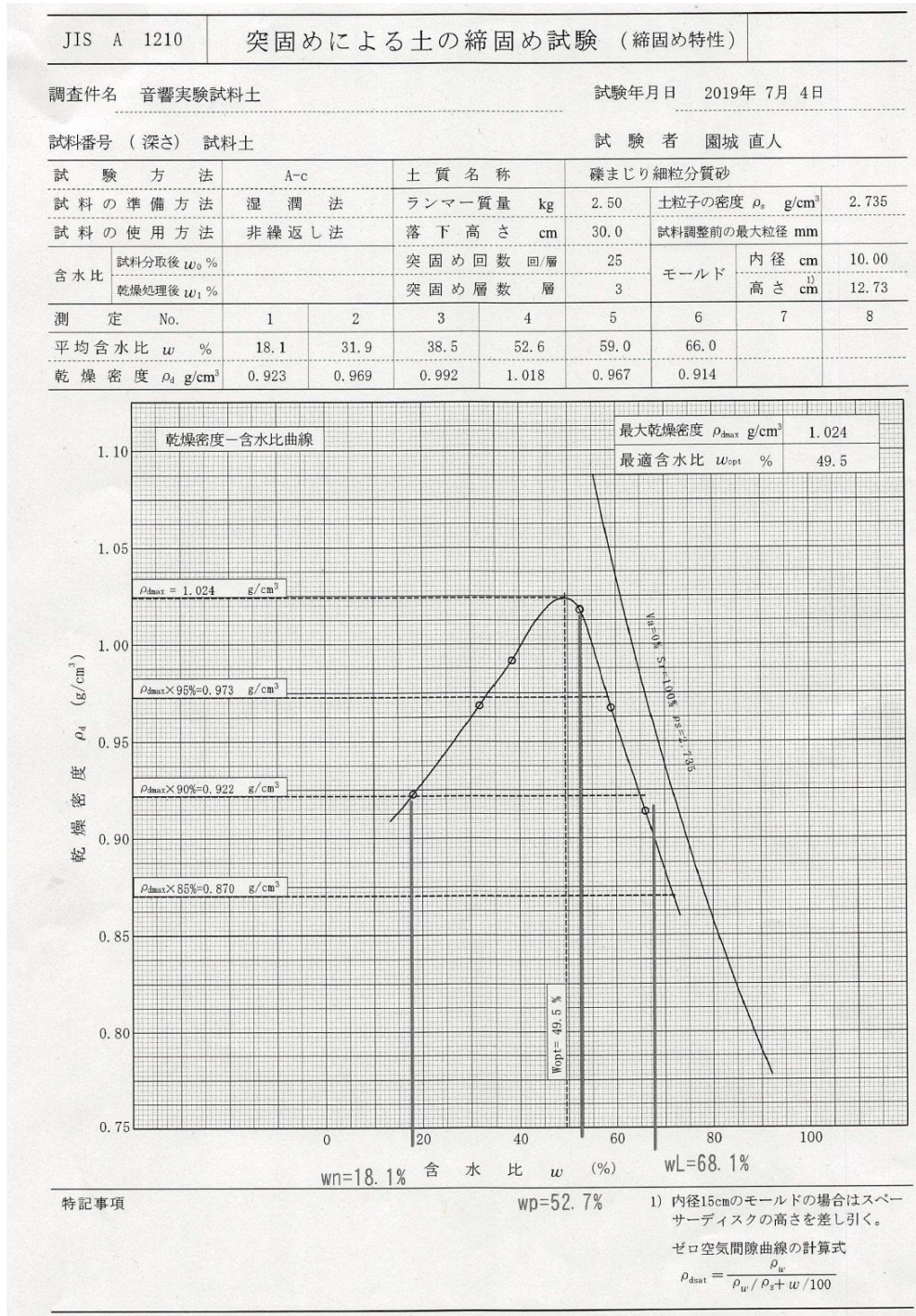


図 A 陸装研・管理土槽室のローム土の締固め特性図

B 陸装研・管理土槽室にて 2019 年 8 月に実施した実験内容表

30 cm ポールペーン		18 cm ホーロー容器		10 cm ホーロー容器		
欠陥深度	計測距離	欠陥深度	計測距離	欠陥深度	計測距離	
5 cm	1 m	5 cm	1 m	有り	○	
				無し	○	
	3 m	5 cm	3 m	有り	○	
				無し	○	
	10 m	5 cm	10 m	有り	○	
				無し	○	
	20 m	5 cm	20 m	有り	○	
				無し	○	
	30 m	5 cm	30 m	有り	○	
				無し	○	
	10 cm	1 m	10 cm	1 m	有り	○
					無し	○
3 m		10 cm	3 m	有り		
				無し		
10 m		10 cm	10 m	有り		
				無し		
20 m		10 cm	20 m	有り		
				無し		
30 m		10 cm	30 m	有り		
				無し		

### C 振動エネルギー比とスペクトルエントロピーについて

本研究では非接触音響探査法による計測評価に振動エネルギー比(VER:Vibration Energy Ratio)とスペクトルエントロピー(Spectral entropy)という 2 つの音響特徴量の分布を用いている。実際のコンクリート内部欠陥は複雑な形状をしていることから、欠陥規模を明らかにするために特定の周波数範囲内の振動速度スペクトル値の二乗値(パワースペクトル値)の積分値を振動エネルギー、(C-1)式のような振動速度スペクトルの積分値を振動エネルギー比と定義して用いて。ここでは、 $PSD_{defect}$ 、 $PSD_{health}$ はそれぞれ欠陥部、健全部のパワースペクトル密度(PSD: Power Spectral Density)、 $f_1$ および $f_2$ は積分時の下限および上限周波数である。

$$[VER]_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{defect}) df}{\int_{f_1}^{f_2} (PSD_{health}) df} \right) \quad (C-1)$$

健全部の評価では、健全部の振動エネルギーの最小値を基準として、健全部の振動エネルギーの分布を計算することになる。また、スペクトルエントロピーとは、信号の白色性を表す音響学的特徴量であり、信号のスペクトルを確率分布と見なし、情報エントロピーを計算したもので、(C-2)式で定義される。ここで、 $S_f$ は測定点での振動速度のパワースペクトルである。

$$H_{SE} = - \sum_f p_f \log_2 p_f, \quad p_f = \frac{S_f}{\sum_f S_f} \quad (C-2)$$

$H_{SE}$ はスペクトルが均一な白色信号では高い値となる。例えば、受光漏れによる計測不良点では白色ノイズに近いいため、また健全部でも振動速度振幅は低い特徴的なピークを持たないため、どちらも白色性が高くなり  $H_{SE}$ も高い値を示して区別できない。しかしながら、この SE と VER という 2 つの音響特徴量を組み合わせ、閾値を適切に選択できれば、欠陥部、健全部および計測不良点の識別が可能となる(表 C 参照)。

表 C 健全部・欠陥部・計測不良点の識別

	健全部	欠陥部	計測不良点
振動エネルギー比(VER)	低い	高い	高い
スペクトルエントロピー(SE)	高い	低い	高い

## D UAV を着陸させた状態の計測について

図 D-1 に UAV 着陸状態での計測セットアップ例を示す。



図 D-1 UAV 着陸状態での計測セットアップ例

この UAV の着陸脚は T 字型をしているため、UAV の向きを調整することにより、UAV の真下領域に LDV の計測領域を設定すること自体は可能であることが分かる。



図 D-2 UAV の着陸脚と音源の位置関係

図 D-2 に UAV の着陸脚と音源の位置関係を示す。着陸脚間の長さは約 500 mm で、音源はそれから約 300 mm 程度上方に取り付けられている。

また、着陸時の音源高さを変更できるように図 D-3 に示すような着脱式高脚脚も製作した。

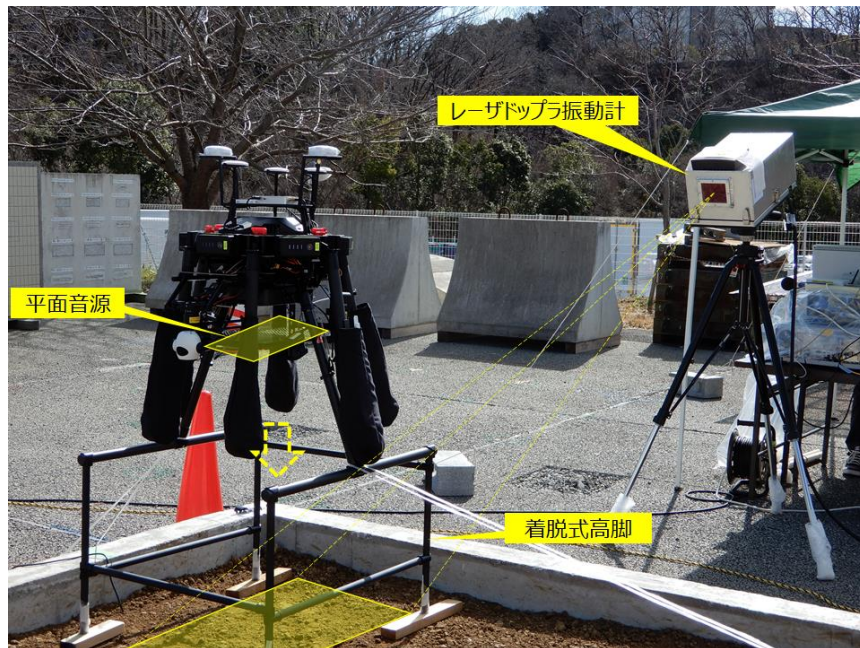


図 D-3 着脱式高脚脚が付いた状態の UAV (ロータは格納状態)

この図は、UAV の可動式脚に、着脱式高脚を取り付けた状態のものであり、この状態でも UAV は飛行可能である。着脱式高脚の高さは約 400 mm であるため、着陸時には、地面から音源までの高さは約 700 mm となる。UAV 着陸状態での計測のメリットは、音源が地面に対して固定されているために、各種信号処理が適用しやすくなること、および UAV のロータ回転数を落とすことにより、ロータ風による雑音が低下し S/N 比の向上が期待できることなどが挙げられる。



## E メディアンフィルターについて

土の振動を測定する際に、埋設物上ではない場所が振動しやすい時がある。要因として小石や雑草等が音波または風により振動している事が挙げられる。そのような測定点がある場合の対処としてメディアンフィルタを検討した。メディアンフィルタは画像のノイズを除去する手法として用いられている。例として図 E-1 に示すような正方形の領域の中心の値を、中心の値を含む周りの値の中心値に変換する手法である。

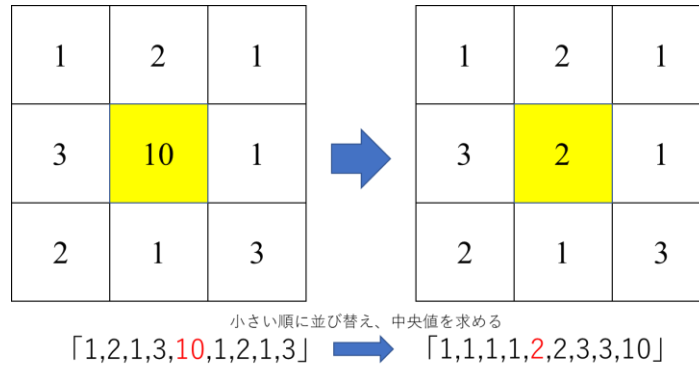


図 E-1 メディアンフィルタの概要

メディアンフィルタ使用時に埋設物に対して十分な測定点が確保されている場合、図 E-1 のように値の高い測定点が隣接し、埋設物と似た形状になる測定結果が得られる。このようなデータに対してメディアンフィルタを適応するとノイズの除去は正常に行われる。しかし、埋設物に対して測定点密度が十分でない場合、突出して高い値を示す埋設物上の測定点は中央値に変換され検出が難しくなる。振動エネルギー分布への適応例を図 33 に示す。

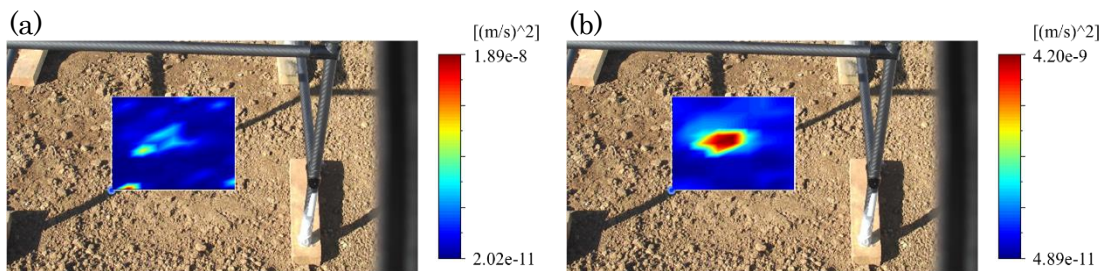


図 E-2 振動エネルギー分布へのメディアンフィルタの適応例

(a)元データ、(b)メディアンフィルタ適応後

\* 2020/2/18 の佐藤工業(厚木)における 50 mm ホーロー容器の測定

図 E-2(a)は左下に高い値を示す測定点があり、中央付近にあると想定される埋設物の色味が薄く表現されている。そこで、メディアンフィルタを適応すると左下の値が高かった測定点は中央値に変換されて、埋設物と思われる反応が明瞭になった。この結果から処理用オプションとしてメディアンフィルタを用いる事は有効であることが分かる。

## F 埋設物があることによる共振周波数の変化について（実際の地雷との比較） （背景と目的）

地中探査実験のデータを空間フィルタで前処理（ローパス）し、広帯域（ $\Delta f=20\text{Hz}$ ）分析した結果、埋設深さが深くなっても埋設物の共振周波数帯域自体はあまり変化しないものの、最大振動速度を示す共振周波数は上がる傾向があることが判明した(後述)。ところが、米国における同様な実験[参考文献 F1]では、全く逆の傾向を示しており、得られた結果が相容れないことが判明した。そのため、この違いの原因について、詳細な比較検討を行った。

### （データ取得条件）

日時；2020.08.17

測定場所；佐藤工業（厚木）

SLDV；PSV-500Xtra

測定ポイント：縦 11x 横 13

送信波形；50-200Hz\_wd1.4s\_chF25Hz\_pd20ms\_intT200ms（シングル）

音源；平面音源（音源固定）

測定対象；180 mm ホーロー 深さ 50 mm (45 mm) 95.2dB (実験 No.2)

180 mm ホーロー 深さ 100 mm(92mm) 95.4dB (実験 No.3)

180 mm ホーロー 深さ 150 mm 95.2dB (実験 No.6)

埋設物なし 95.2dB (実験 No.7)

### （実験結果例）

図 F-1 に示すように、比較的広い周波数分解能（ $\Delta f=20\text{Hz}$ ）で、測定した全 143 点のデータを俯瞰すると、埋設深さが 50, 100, 150 mm に対応して、それぞれ共振周波数は、80, 100, 120 Hz とみた。また、この 80~120 Hz 域では、埋設物があることで（埋設物なしに比べ）5~7 dB ほど振れやすくなっていることがわかる。更に、図 F-2 には、埋設上の代表点（それぞれ 3 点）を抜き出してみたが、埋設の深さの違いにより共振周波数の変化が確認できた。

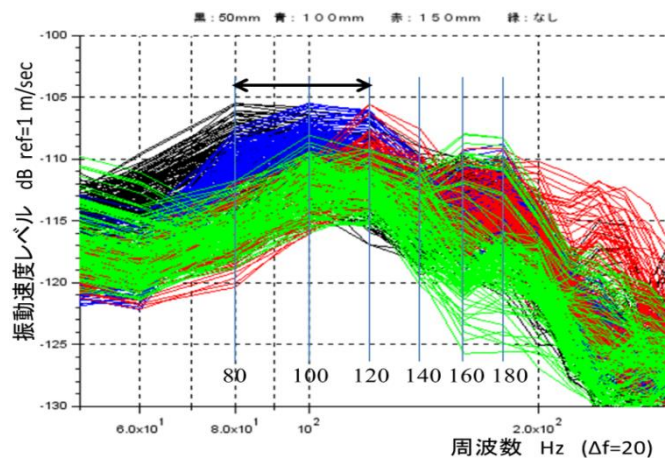


図 F-1 全データ重ね書き(黒:50mm,青:100,赤:150,緑:なし)

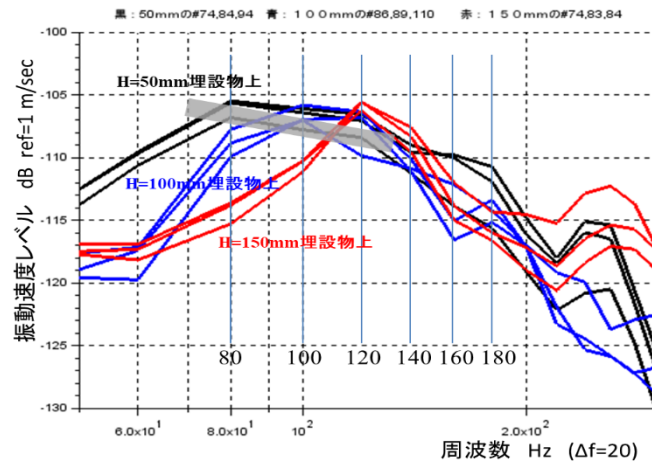


図 F-2 埋設物上代表 3 点の特性(黒:50mm,青:100,赤:150)

以上は、比較的広い周波数分解能 ( $\Delta f=20$  Hz) でみたが、より詳しくみるため、 $\Delta f=5$  Hz で分析した結果を図 F-3 に示す ( $\Delta f=10$  Hz は参考として、図 G-1 に示す)。結果、共振と見られるピークは上記の 3 周波数以外にも確認でき、振動はもう少し複雑であることがわかる。おおよそ、埋設深さ毎の共振は以下の領域にある。

埋設深さ 50 mm ; **75 Hz(大)**、90 Hz(中)、115 Hz(小)

埋設深さ 100 mm ; **90 Hz(大)**、120 Hz(中)

埋設深さ 150 mm ; 80 Hz(小)、**125 Hz(大)**

ここで、 $120\pm 5$  Hz 域には 3 仕様と共振をもつことがわかる。もっとも、埋設物がなくても、 $100\sim 130$  Hz 域には (埋設物有りよりも振動レベルは  $5\sim 7$  dB 小さいものの) 共振があり、土壌としても固有の振動特性とみる (図 G\_2 参照)。

$\Delta f=5$  Hz の分析により、最大レベルの共振の詳しい周波数は、埋設深さ 50 mm で 75 Hz、埋設深さ 100 mm で 90 Hz、埋設深さ 150 mm で 125 Hz と確認できたので、以降、これらの 3 つの共振に焦点をあて、参考文献との差を詳しく分析する。

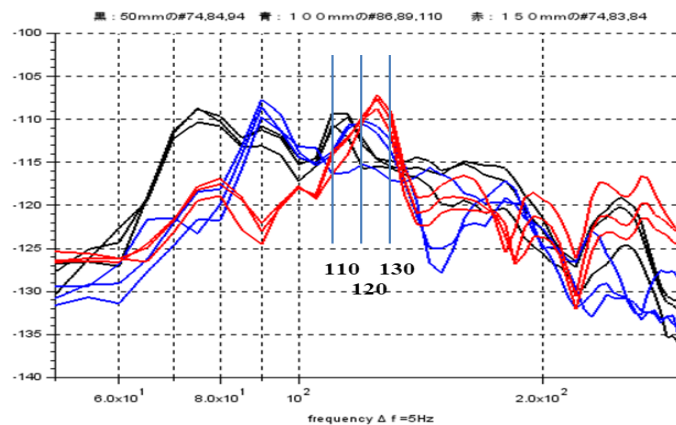


図 F-3 図 F-2 詳細 (2)  $\Delta f=5$  Hz 分析(黒:50mm,青:100,赤:150)

**(参考文献の実験結果俯瞰)**

参考文献[F1]では、その 2711 ページに以下のように記しており、当方の実験結果と対照的である。 別途、彼我の差を表 F-1 に示すが、鍵となる部分は以下の点とみた。

- 埋設物；対戦車用地雷 VS1.6(Google で詳細あり、図 F-4 に添付)
- 土壌；gravel (砂利) とだけ記載 (粒状など説明はない)。

ISO 14688 grades gravels as fine, medium,  
and coarse with ranges 2 mm to 6.3 mm to 20 mm to 63 mm.



Specifications  
Weight: 3 kg  
Explosive content: 1.85 kg  
Diameter: 222 mm  
Height: 92 mm  
Operating pressure: 180 to 220 kg

**出典 ; wikipedia**

A soldier examines two upside-down VS-1.6 mines in Iraq.

図 F-4 参考文献の実験の埋設物 (地雷)

- 埋設深さ(H)と共振周波数の関係 ; 添付図 5 (参考文献の FIG.9.) から次のように読み取った

H=0 236Hz (但し、Table1 には 230Hz と記載あり)

H=25mm 162Hz

H=75mm 115Hz

ここで、H=0 の場合の共振は、地雷のプレッシャープレート単独の共振である。

共振のメカニズムについては 2711 ページの下記の説明 (参考文献 F1) と、添付図 F-6 (参考文献 F1 の FIG.1.) のモデルから地雷上の筒状の土壌の可動質量 ( $M_s$ ) が 1 自由度の振動をしており、深さと共に質量は増大し (加えて、深さと共に、可動質量の横部の剪断剛性  $K_{s1}$  の増加、可動質量本体の圧縮剛性  $K_{s2}$  の低下) より、シンプルに説明できている。

## 2. Effect of mine's burial depth

Analysis of the developed model shows that the mine's depth is an important parameter affecting the resonance frequency of the mine/soil system and, most importantly, the magnitude of the system impedance. The lower the impedance of the mine/soil system, the greater the contrast with surrounding soil, and, as a result, the easier to find the mine. As the depth increases, the resultant impedance tends to increase as well, thus reducing the contrast. Figure 9(a) demonstrates this effect for AT mine VS1.6, buried in

gravel at 0 m, 25 mm, and 75 m. Figure 9(b) shows similar results calculated using the spring-mass model and the mine parameters from the Table I. In the calculations we used depthdependent soil parameters defined by formulas (1) and (3):  $M_S \sim H$ ,  $K_{S2} \sim H^{-1}$ ,  $R_{S1} \sim H$ , and  $R_{S2} \sim H$ . For shear stiffness  $K_{S1}$ , however, the dependence  $K_{S1} \sim H^{0.5}$  is better fitted with the experimental data. The dependence  $K_{S1} \sim H$ , introduced by the formula (2), is based on the assumption that the shear stress is developed between the side surface of the soil column above the mine and the surrounding soil. In fact, the stress is distributed within the soil, so the resultant effective shear force may have more complicated dependence with the depth.

赤線と赤字は追記したもの

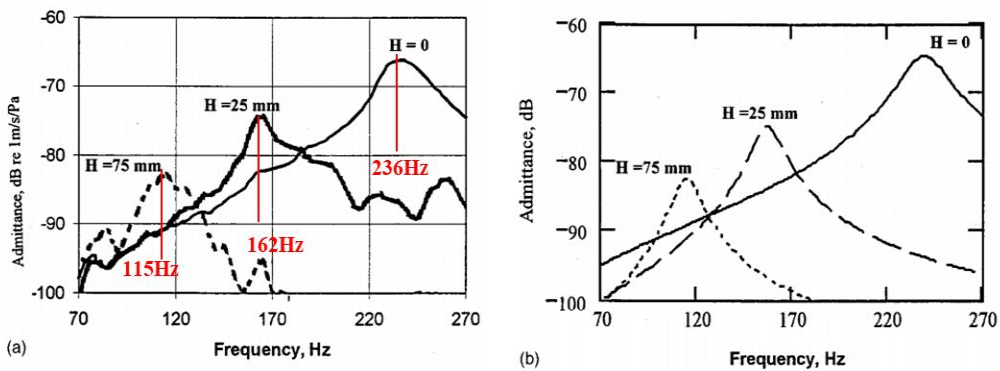


FIG. 9. Impedance dependence on mine burial depth: (a) field data for AT mine VS1.6; (b) calculated data for the same mine.

図 F-5 埋設深さ(インピーダンス)と共振周波数の関係 (a)実験 (b)計算  
(参考文献 F1 より)

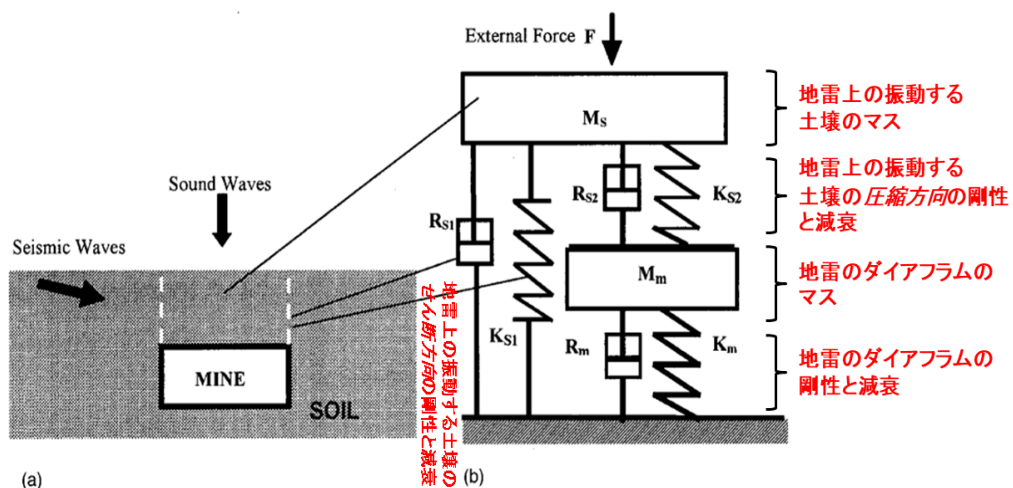


FIG.1. Mine buried in soil and excited with sound or seismic waves (a), and an equivalent mechanical (dynamical) diagram of this mine/soil system (b)

図 F-6 振動モデルの策定 (参考文献 F1 より、赤字部は追記したもの)

**(詳細比較)**

以上の結果を踏まえ、埋設深さと共振周波数の関係が、彼我で逆の傾向となる理由を推定するため、文献からの情報を集約結果、ならびに計算をおこない表 F-1 としてまとめた。

以下、主としてこの表をベースに、埋設深さと共振周波数の関係が、彼我で逆となる要因になりうる差異ある部位、要素について考察していく。主な違いは以下の 4 点である；

- 1) 土壌：砂利と赤土の差がある。比重、粘性などの差はあるが埋設深さと共振周波数の傾向が逆転するとは考えにくい。
- 2) 埋設物の形状と剛性：地雷の場合、土壌と共に動く可動部 (pressure plate)、即ち受圧部がプランビュー面積の約 30% と小さいのが特徴である。対して、ホーローはフランジの部分はややあるが、プランビュー面積のほとんどで受圧する。  
また、地雷の下面はリブ付きのプラスチックであり、上面より剛性が高いとみる。  
ホーローの下面は柔らかな蓋であり剛性は低い。  
後で、図 F-5 のアドミタンス特性を使った比較でも論議するが、この形状と、下部の剛性の差が、埋設深さと共振周波数の傾向に影響している可能性が高い。  
上面の面剛性：文献には地雷のプレッシャープレートの剛性値 ( $2.5 \times 10^7$  Pa/m) あり比較をするため、使用したホーロー容器の剛性を計算した。詳細は付録の計算 1 に記載したが、ホーローの面剛性 ( $3.2 \times 10^7$  Pa/m) は地雷よりやや高い値である。主に、周辺の支持構造が違うため (地雷；ピン支持、ホーロー；固定支持) である。なお、ホーローの場合、通常の剛性 (= 面剛性に面積をかける) は 82 kgf/mm で、大人一人が上に乗って約 1 mm の変位する程度である。
- 3) 土壌の振動部の形状：文献では図に示していないが、可動部は円筒形状であると記している。一方、ホーローの場合 (図 G-3 より) も概略は円筒形とみられるがホーローの底面よりやや広い規模である。赤土の凝集力により (せん断力で) 周辺部に振動が伝わりやすくなったものとみる。但し、振動形状に多少の差があったとしても、上述の共振周波数の逆転が起きるとは考えにくい。
- 4) 評価指標：現在、指標が両者で違う。そこで、同じ評価ができれば詳しい差が見えると考えた。今回、図 F-5 に示した参考文献にある伝達関数のアドミタンス ( $= [\text{土壌表面振動速度}] / [\text{土壌表面上の音圧}]$ ) に合わせるため、当方のデータを以下の仮定にもとづき処理を行った。  
(仮定) アドミタンスの分母である、[土壌表面上の音圧]として、別実験で測定した土壌上部音 (高さ、100 mm 程度) で代替が可能である。  
(処理) 今回の送信波形は、50-200Hz\_wd1.4s\_chF25Hz\_pd20ms\_intT200ms (シングル)で、土壌上部音を測定したときの、送信波形は 50-152 Hz のため、  
伝達関数  $H(\omega) = \text{土壌上部音 } 50-152\text{Hz}(\omega) / \text{送信波形 } 50-152\text{Hz}(\omega)$

をいったん計算し、

土壌上部音 50-200 Hz( $\omega$ )の予測値= $H(\omega)$ \*送信波形 50-200 Hz( $\omega$ )

で算出した。

以上の処置より、当方のホーローを深さ H=50 mm に埋設した時のアドミタンスを計算し、図 F-5 に赤線で記した。結果、以下のことがわかる。

- ① ホーローではアドミタンスが低周波（75 Hz 付近）において地雷より高い。即ち、剛性が地雷より低い。仮に直径をホーローの  $\Phi 190$  として等価剛性をみると、

$$\text{ホーロー } 400 \text{ N/mm} < \text{地雷 } 600 \text{ N/mm} \quad \text{地中}$$

であり、表 F-1 に単品での面剛性として示した

$$\text{ホーロー } (3.2 \times 10^7 \text{ Pa/m}) > \text{地雷 } (2.5 \times 10^7 \text{ Pa/m}) \quad \text{単品}$$

と、地中では剛性が逆転することである。また、上述したようにホーローの単品剛性は 82 kgf/mm (=808 N/mm) であり、ホーローは地中では大幅に剛性を失うことがわかる。

表 F-1 彼我の実験条件、特性などの詳細比較

	Steven Institute of Tech, New Jersey	桐蔭横浜大学	桐蔭横浜の特徴
			
実験日時場所	June. 2001 米陸軍の野外実験場	18th August 2020 厚木佐藤工業研究所	
土壌	gravel(砂利)を紹介; sandy(砂質)も実施	赤土	赤土(粘性大か?)
埋設物	対戦車地雷 VS-1.6	ホーロー容器(底面が上)	
形状、寸法	プランビュー $\Phi 222$ 上面;可動部は $\Phi 125$ 程度 下面;リップ付きプラスチック	プランビュー $\Phi 180$ 上面;可動部も $\Phi 180$ 下面;樹脂の蓋	可動、受圧面積大 支持剛性低
材料	t=12mm プラスチック	t=0.84(実測 鋼+ホーロー)	
面剛性(Pa/m)	$2.5 \times 10^7$ (TABLE1記載) ピン支持	$3.2 \times 10^7$ (高木計算1参照) 固定支持	剛性やや高いよう
共振(埋設無し単体)	220Hz(または図より読み取り236Hz)	257Hz(高木計算2参照)	周波数やや高い
土壌の振動部の形状	埋設物直径の筒状(記載のみ記載なし)	埋設物直径かやや大きい(H=50mm)(図A.3参照)	振動領域やや大かも
深さ(mm)	0, 25, 75を紹介 (最大130まで実施)	50, 100, 150	やや深めまで実施
入力	スピーカ(詳細説明なし) 周波数スイープ	平面スピーカ 50-200Hz_wd1.4s_chF25Hz_pd20ms_intT200ms (シングル)	
出力と測定器	土壌表面速度(V) with a LDV 土壌上10mm位置騒音(P)	土壌表面速度(V) with a LDV -(別実験での土壌上騒音を一部使用)	
測定周波数域	70~520Hz	50~200Hz	
評価指標	インピーダンス Z=P/V またはアドミタンス V/P	表面速度(V)	
深さvs共振周波数(f0)	0mm→236Hz(実測) 25mm→162Hz(実測) 159.2Hz(高木計算) 75mm→115Hz(実測) 91.9Hz(高木計算3参照)	50mm→75(実測), 126.9Hz(高木計算3参照) 100mm→95(実測), 89.7Hz(高木計算) 150mm→125(実測), 73.2Hz(高木計算)	H=50mmが計算より大幅に低い
実測と計算			

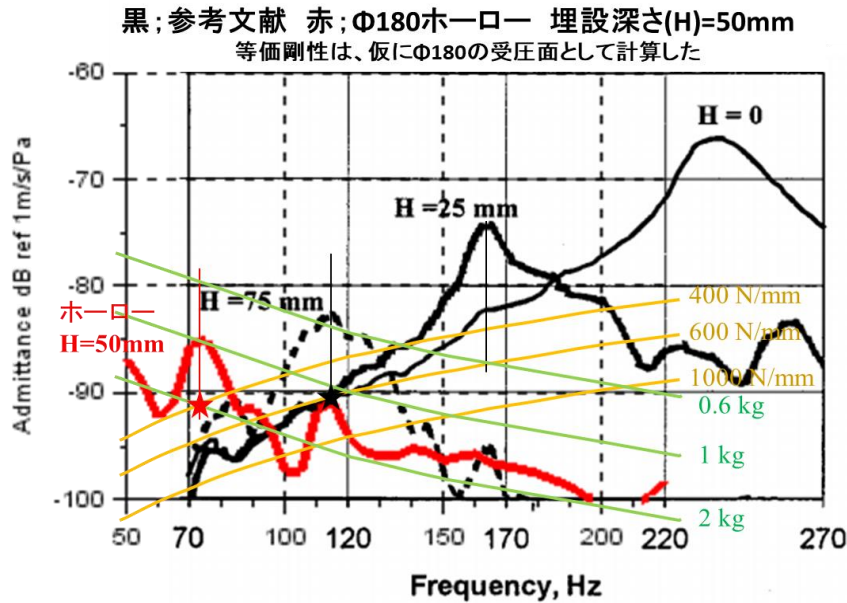


図 F-7 図 F-5 に当方のアドミタンスを上書き (赤字)

この、地中においてホーローが剛性を大きく失うことが、共振周波数の逆転の主要因であると推測している。では、剛性を失う（それも浅い埋設深さ 50 mm の場合）理由については検証実験が必要であるが、現時点では以下の点が要因として考えられる。

『ホーローは、高い振動受圧（もしくは大きな速度振幅時には）と、マイクロなスリップを起こし動いてしまうため、高い剛性を保持できない』

これにより、これまで見てきた次の事象が説明できる。

- ① 地雷では起きない？；表 F-1 に示すように、地雷は受圧面積の割には土との接触面積がホーローより大幅に大きく、更に下面の剛性もホーローより大のため。
- ② 埋設深さが 50 mm で起きやすいのはなぜか？ ホーローの上面での受圧は埋設深さが浅いほど（中間にある土壌の質量が小さく）大きいため。  
また、振動する土壌の側面でのせん断剛性、減衰（図 F-6 の KS1 と RS1）も 100、150 mm の場合より小さい。

速度でも、（ホーロー上面で振動する）土壌の速度は浅いほど大きく、ある速度値をしきい値として、ホーロー側面と土壌の間にスリップが起きるとみる。特に、上述のせん断剛性の低い 50 mm 時は起きやすい。  
これは、摩擦の特性[参考文献 F3]から説明されるのではと考える。

#### (まとめ)

埋設深さと土壌の共振周波数の傾向について、参考文献と相容れない結果があったので、彼我の詳細分析を行った。その結果、ホーロー容器の場合、例えば、埋設深さ 50 mm



の地中では大幅に剛性を失っており、共振周波数を低下させていることがわかった。また、そのメカニズムとしては、ホーロー容器の支持剛性が低く、高い振動受圧を受ける場合、マイクロなスリップを起こしているためと推測される。ただし、これについてはさらなる検証が必要であると思われる。

#### (参考文献)

- [F1] Nonlinear seismo-acoustic land mine detection and discrimination  
Dimitri Donskoy et al., Stevens Institute of Technology,  
711 Hudson Street, Hoboken,  
New Jersey 07030 [DOI: 10.1121/1.1477930]
- [F2] 機械振動 亙理 厚 丸善株式会社 65 ページ
- [F3] まさつの物理 松川 宏, 生産と技術 第 50 巻 第 4 号(1998)

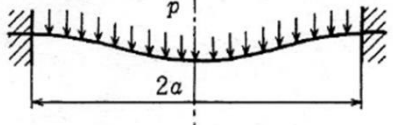
### G ホーロー容器の共振周波数について

#### (計算 1)

ホーロー容器の動的剛性 (Pa/m) について求める。

まず、円板は周辺を固定され、面内に等分布の荷重( $p$ )がはたらくものとする。この場合、中心から半径  $r$  部における変位( $w$ )は、機械工学便覧の材料力学の章から、以下のようになる。

円板, 周辺固定, 等分布荷重



$$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$$

$$w_{\max} = (w)_{r=0} = \frac{pa^4}{64D} = 0.171 \frac{pa^4}{Eh^3}$$

図 G-1 周辺固定時の円板の変位

ここで、本モデルのため単純化するものとして、面内の平均変位( $w_{ave}$  とおく)を考える。この場合、変位の半径方向の平均をとればよいから、以下のよう求めた。

$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$  の平均値を求める

$y = \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$  とする

$$J_{ave} = \frac{\int_0^a \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 2\pi r dr}{\pi a^2}$$

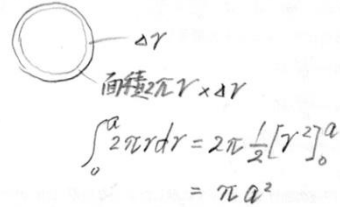
$$= \frac{2\pi}{\pi a^2} \int_0^a \left(r - \frac{2}{a^2}r^3 + \frac{r^5}{a^4}\right) dr$$

$$= \frac{2}{a^2} \left\{ \frac{1}{2}[r^2]_0^a - \frac{2}{4a^2}[r^4]_0^a + \frac{1}{6a^4}[r^6]_0^a \right\}$$

$$= \frac{2}{a^2} \left( \frac{1}{2}a^2 - \frac{1}{2}a^2 + \frac{1}{6}a^2 \right)$$

$$= \frac{1}{3}$$

よって、 $w$  の平均値は  $w_{max}$  の  $1/3$



ここで、 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$  であるから

$$w_{ave} = \frac{1}{3} \frac{pa^4}{64D} = \frac{1}{16} \frac{(1-\nu^2)}{Eh^3} pa^4 \dots \dots (G1)$$

である。

よって、ここで単位圧力  $P=1$  (pascal) についての面剛性  $Ka$  (バネ定数: 単位 N/m) は (G1) 式で  $P=1$  として逆数をとればよく

$$Ka = \frac{16}{(1-\nu^2)} \frac{Eh^3}{a^4} \dots \dots (G2)$$

となる。

ホーローの場合、 $\Phi=180\text{mm}$  (半径  $a=0.09\text{ m}$ ), ポアソン比 $=0.3$ , ヤング率は鉄の部分として  $200\text{ Giga Pascal}=2 \times 10^{11}$  (Newton/meter), 厚み  $h=0.84\text{mm} \rightarrow 8.4 \times 10^{-4}$  meters としてみると  $3.177 \times 10^7\text{ Pa/m}$  (→表 F-1 に記載) となる。

### (計算 2)

ホーローの底板の共振周波数  $f_0$  を求める。

境界条件として、周辺固定とする。ここで以下の公式[参考文献 F2]を使う。

$$f_0 = 10.17 * \frac{1}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}$$

$a, E, \nu$  は計算 1 と同じく、それぞれ半径、ヤング率、ポアソン比である。また、 $\rho$  は密度で、鉄の場合、 $7800\text{ Newton Sec}^2/\text{m}^4$  であり、 $10.17$  は周辺固定の場合の運動方程式の根 (ベッセル関数) である。

これから、共振周波数  $f_0$  は 257Hz となる。

### (計算 3)

参考文献のモデルのように、地雷のプレッシャープレート上（ホーローの場合、底板）の上の土壌を円筒形と考え、この部分が可動マスとして振舞う場合の共振周波数を計算する。この場合、プレッシャープレート（底板）の剛性をバネとして計算すればよいから、

$$\text{可動マス (質量 kg) } M = 1000\rho \cdot \pi a^2 \cdot H$$

ここで、 $\gamma$  は比重、 $a$  は半径(m)、 $h$  は埋設深さ(m)である。

剛性  $k$  は面剛性  $Ka$  に実面積  $\pi a^2$  をかければよい。即ち

$$\text{剛性 } K = Ka \cdot \pi a^2$$

よって、共振周波数  $f_0$  は

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

具体例として、参考文献の埋設深さ  $H=75\text{mm}$  時と、当方の埋設深さ  $H=50\text{mm}$  時の共振周波数を求める。

まず参考文献の埋設深さ  $H=75\text{mm}$  時は、

比重  $\gamma$  は仮に 1 とし、半径  $r=0.111\text{m}$   $H=0.075$  (m)より、質量  $M$  は

$$\begin{aligned} M &= 1000 \cdot 1 \cdot 3.1416 \cdot 0.111^2 \cdot 0.075 \\ &= 2.093 \text{ kg} \end{aligned}$$

$Ka$  は文献の TABLE1 から、Mine type が VS-1.6 の Dynamic Stiffness  $2.5 \times 10^7$  (Pa/m) から

$$\begin{aligned} K &= Ka \cdot \pi a^2 \\ &= 2.5 \cdot 10^7 \cdot 3.1416 \cdot 0.111^2 \\ &= 9.677 \cdot 10^5 \text{ Newton/m} \end{aligned}$$

よって、共振周波数  $f_0$  は

$$\begin{aligned} F_0 &= 1 / (2 \cdot 3.1416) \cdot \text{sqrt}(9.677 \cdot 10^5 / 2.903) \\ &= 91.9 \text{ Hz} \end{aligned}$$

となる。

同様に、当方の埋設深さ  $H=50\text{mm}$  時は、

比重  $\gamma$  は同じく仮に 1 とし、半径  $r=0.090\text{m}$   $H=0.050$  (m)より、質量  $M$  は

$$\begin{aligned} M &= 1000 \cdot 1 \cdot 3.1416 \cdot 0.090^2 \cdot 0.050 \\ &= 1.2723 \text{ kg} \end{aligned}$$

$Ka$  は、計算 1 のとおり、 $3.177 \times 10^7$  (Pa/m)から

$$\begin{aligned} K &= Ka \cdot \pi a^2 \\ &= 3.177 \cdot 10^7 \cdot 3.1416 \cdot 0.090^2 \\ &= 8.0845 \cdot 10^5 \text{ Newton/m} \end{aligned}$$

よって、共振周波数  $f_0$  は

$$F_0 = 1 / (2 * 3.1416) * \sqrt{8.0845 * 10^5 / 1.2723}$$

$$= 126.9 \text{ Hz}$$

となる。

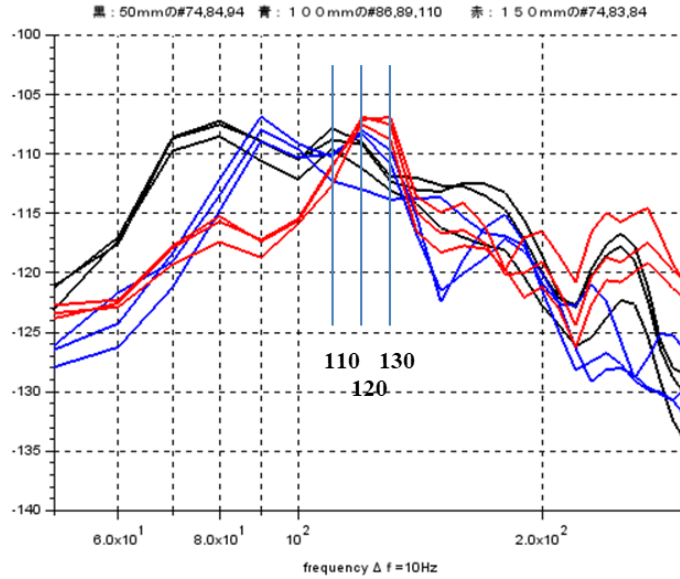


図 G-1 図 F-2 の詳細 (1)  $\Delta f = 10 \text{ Hz}$  分析(黒:50mm,青:100,赤:150)

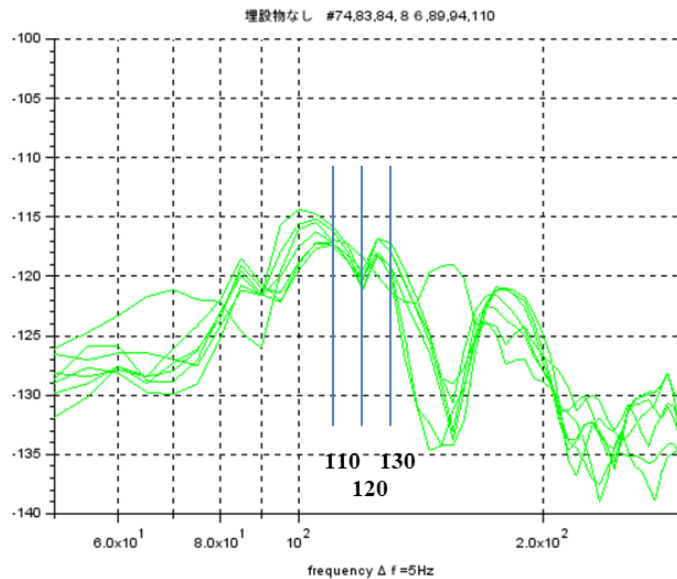


図 G-2 図 F-2 の詳細 (2)  $\Delta f = 5 \text{ Hz}$  分析埋設物なし

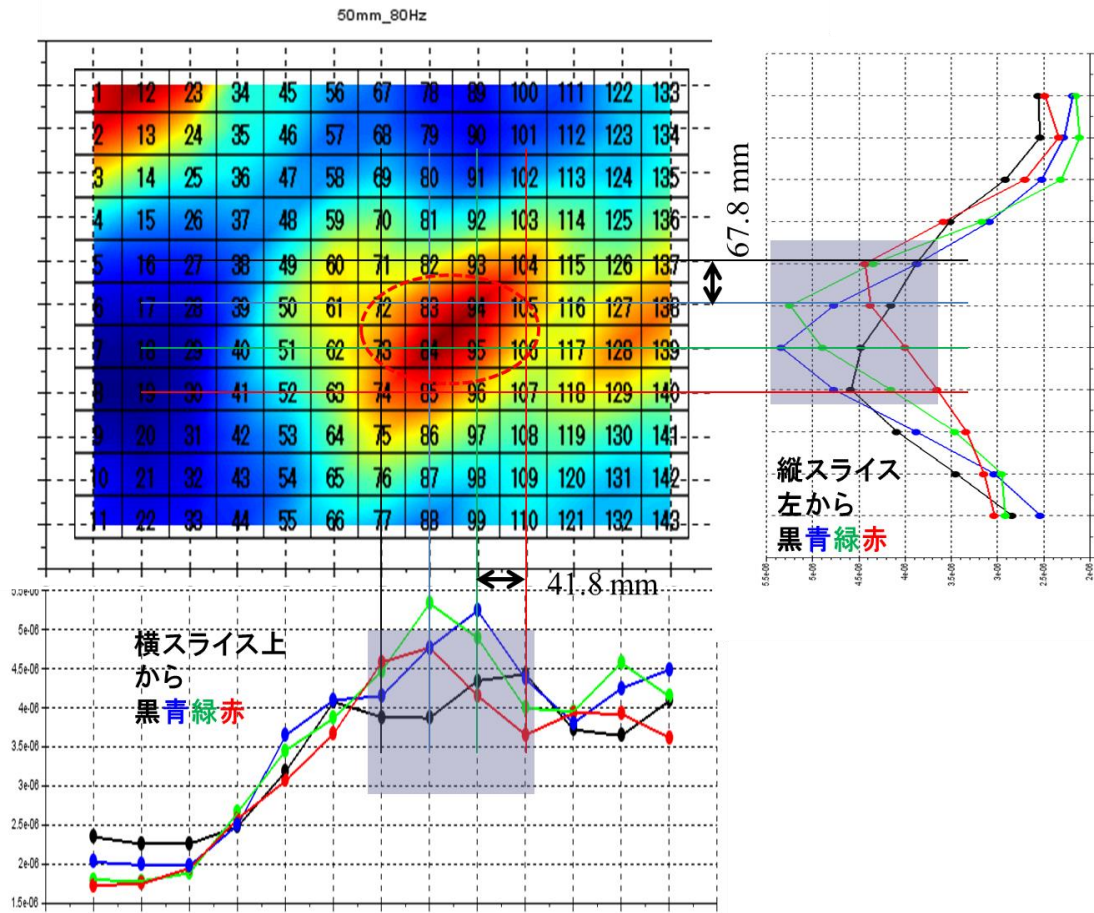


図 G-3 埋設深さ 50mm 80 Hz 振動のレベルと規模

## H レーザ軸方向振動速度に及ぼす振動速度分布とレーザ入射角の影響

図 H-1 に、珪砂実験時の振動速度分布図を示す。図より周囲よりも振動速度が大きい個所が確認できる。図中の白い円は、この周囲より振動速度が大きい個所を、埋設物の大きさである約 100 mm 程度の直径の円で囲んだものである。この円の位置が埋設物の検出位置であるが、この領域内のさらに振動速度の大きい個所は白い円の中心から、わずかに下にあることがわかる。この原因は、砂表面上の振動速度分布（垂直方向）とレーザの入射角度による影響が考えられる。

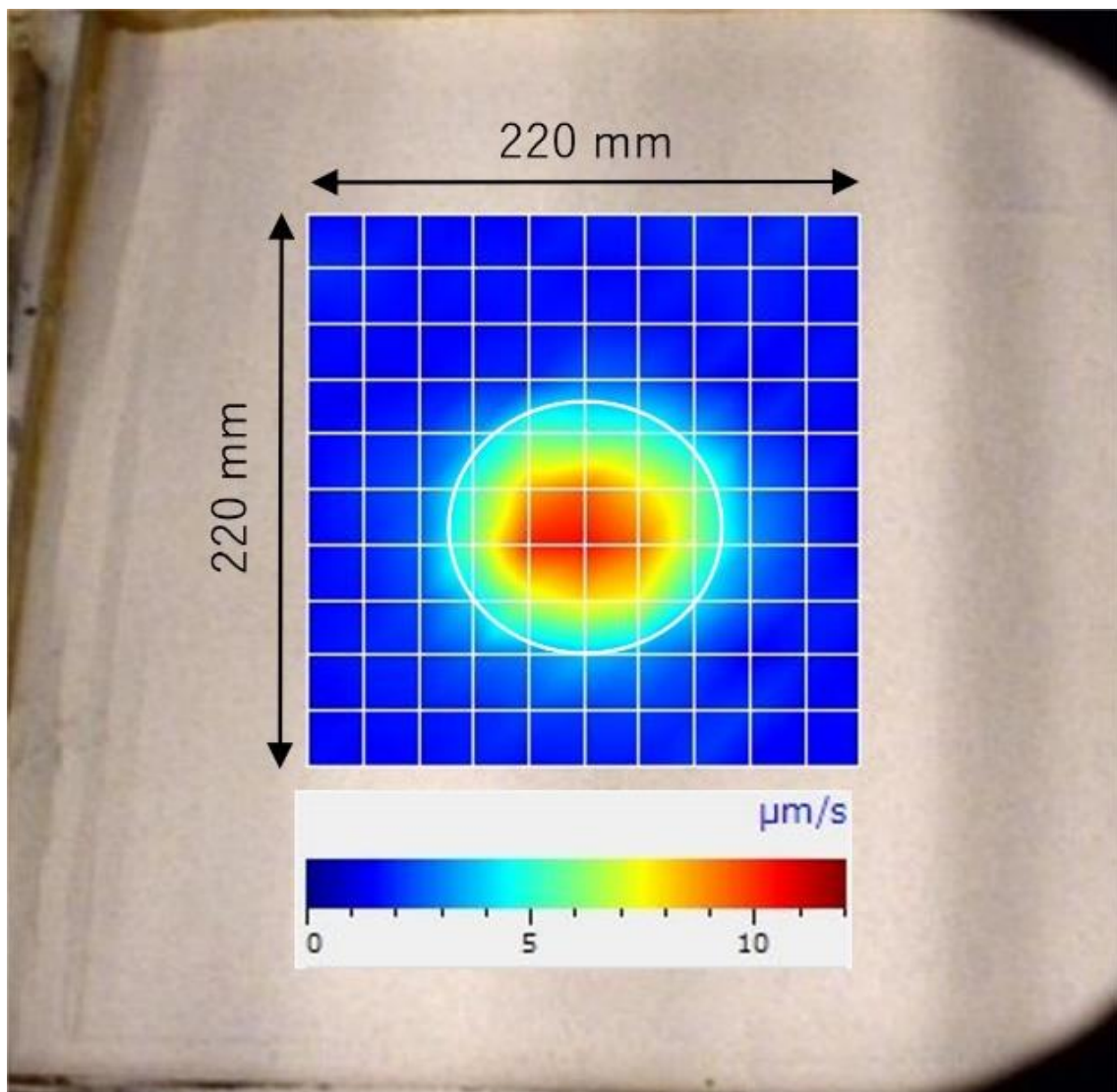


図 H-1.中空円形容器（直径 100 mm、深さ 50 mm）の検出結果例  
（149 Hz での振動速度分布）。

そこで、レーザ軸方向振動速度に及ぼす振動速度分布とレーザ入射角の影響に関する理論計算を行った。図 H-2 に示すように、測定面の振動速度分布（垂直成分）は  $V(x)$  であり、測定点に対する SLDV レーザービームの入射角は  $\theta(x)$  ( $x$  は 埋設物の中心からの地表面上の距離、垂直入射は 90 度)。このとき、測定位置  $x$  でのレーザビームの軸方向成分の振動速度  $V_L(x)$  は、式 (H1) で表すことができる。

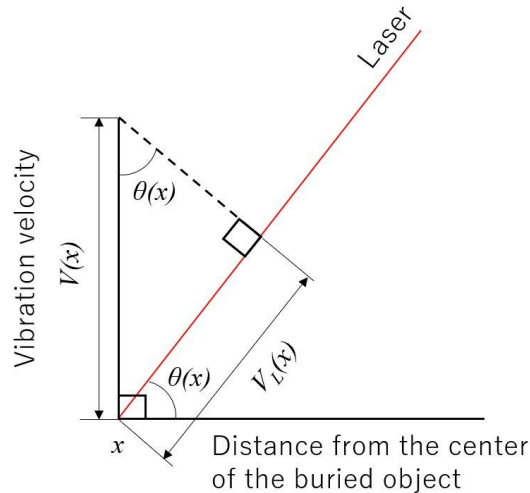


図 H-2. 入射角とレーザ軸方向振動速度の関係。

$$V_L(x) = V(x) \cdot \sin\{\theta(x)\} \quad (\text{H1})$$

円形の埋設物体の曲げ共振の振動速度分布（垂直成分）を余弦波で近似できると仮定すると、 $V(x)$  は式 (H2) で表すことができる。

$$V(x) = V_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{r}\right) \quad (\text{H2})$$

ここで、 $V_m$  はたわみ共振中心の振動速度の最大値、 $r$  は埋設物の半径、 $x$  は測定位置 ( $-r \leq x \leq r$ ) である。したがって、半径  $r$  の埋設物の任意の位置での軸方向の振動速度は、式 (H3) で与えられる。 $\theta(x)$  は測定位置  $x$  ごとに変化する。

$$V_L(x) = V_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{r}\right) \cdot \sin\{\theta(x)\} \quad (\text{H3})$$

珪砂実験セットアップでは、SLDV から埋設物の中心までの距離を 836 mm、地表面から SLDV までの高さを 732 mm とすると、レーザビームの中心に対する入射角は埋められたオブジェクトは約 61.1 度となる。もし、直径 100 mm の円形埋設物上の砂層部が、たわみ共振により振動していた場合、埋設物上における SLDV に近づく方向および遠ざかる方向のレーザ軸方向振動速度の変化は (H3) 式で計算することができる（簡単にするために  $V_m = 1$ ）。計算結果例を図 H-3 (a) に示す。レーザ軸方向振動速度の最大値は、埋設物の中央部より上で測定されていることがわかる。

一方、図 H-3 (b) は、埋設物の中心付近にのみ均一な振動分布を与えた場合の計算結果の例を示している（ここでは、中心から $\pm 15\text{mm}$  の範囲の振動速度は一定に保たれ、その後徐々に減少させた）。均一な振動分布が得られる範囲では、レーザの軸方向振動速度は、SLDV に近づくにつれて増加し、離れるにつれて減少する傾向があることがわかる（SLDV に近づく方向がプラス側）。曲げ振動の場合、レーザ軸方向振動速度の最大値が埋設物の中心から SLDV に向かって移動するためには、埋設物の半径約  $250\text{mm}$  以上が計算上必要となる。

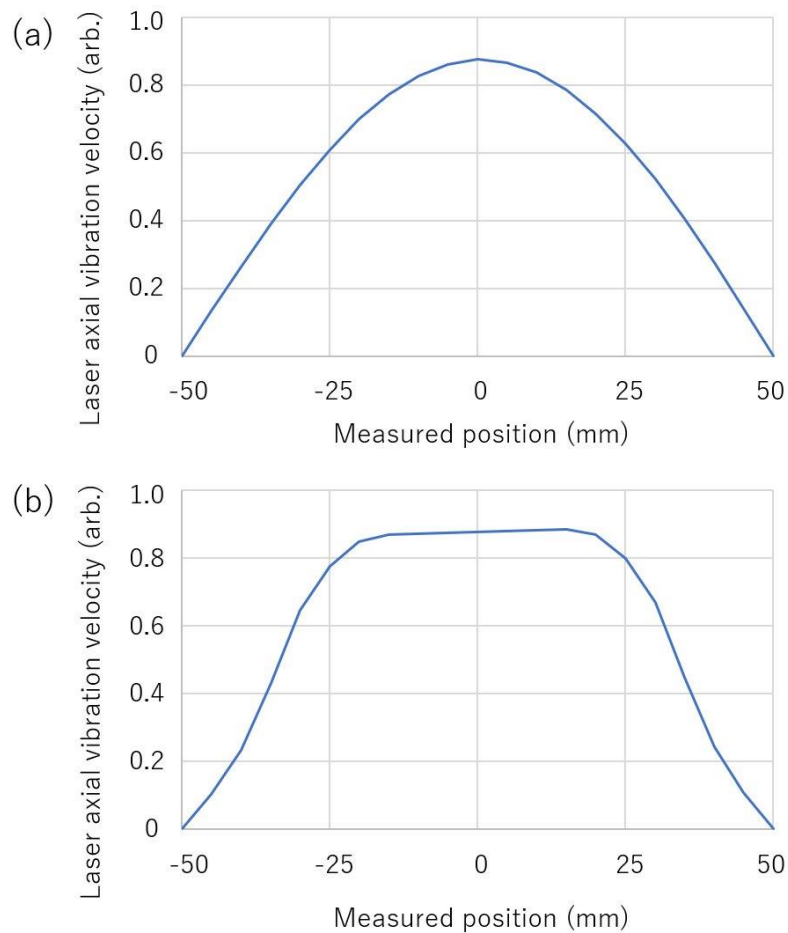


図 H-3. 埋設物（半径  $50\text{mm}$ ）に基づくレーザ軸方向振動速度の計算例.

(a) たわみ振動分布を与えた場合、(b) 均一分布を与えた場合（中心から $\pm 15\text{mm}$  以内）。



## 学会等発表実績

委託業務題目「UAVを用いた音波照射加振による浅層地中探査技術の基礎研究」

機関名 桐蔭横浜大学

種別	題目	発表者名	学会名、学会誌名 (巻号頁)	発表年月日	備考
学術論文	A Fundamental study for long-distance noncontact shallow underground exploration technology by acoustic irradiation- induced vibration	T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda	Jpn. J. Appl. Phys., Vol.60	2021年4月30日	国内英文誌 (査読有)
学術論文	音響照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触浅層地中探査法に関する研究—関東ローム土を用いた長距離計測に関する基礎検討—	上地樹, 杉本恒美	桐蔭論叢 第44号	2021年6月15日 刊行予定	学内紀要 (査読無)
学術論文	音響照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触浅層地中探査法に関する研究—珪砂を用いたレーザの照射角度に関する基礎検討—	中川裕, 杉本恒美	桐蔭論叢 第44号	2021年6月15日 刊行予定	学内紀要 (査読無)
学会発表	UAVからの音波照射加振による浅層地中探査技術のための基礎検討	杉本恒美, 上地樹, 中川裕, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳	土木学会第75年次学術講論集 V-396,2頁, (2020. 9. 9-11 オンライン発表)	2020年9月9~11日	国内学会 オンライン発表
学会発表	音波照射加振による非接触浅層地中探査法の基礎研究-珪砂土壌を用いた場合	杉本和子, 杉本恒美, 歌川紀之, 黒田千歳	音響秋季講論集, 3-7-15, p77 pp.543-544, 2020.09.11 (オンライン発表)	2020年9月11日	国内学会 オンライン発表

学会発表	Fundamental Research on Shallow Underground Exploration Technology by Acoustic Irradiation Induced Vibration from UAV	T.Sugimoto, K.Sugimoto, I.Uechi, N.Utagawa, C.Kuroda	2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) Online Presentation (Poster Presentation, Paper ID 1242, Session code: D1P-23 (日本時間9月11日 20:25-20:35))	2020年9月11日	国際学会オンライン発表
学会発表	音波照射加振を用いた珪砂土壌における非接触浅層地中探査法の研究	杉本恒美, 杉本和子, 歌川紀之, 黒田千歳	日本非破壊検査協会、2020年度秋季講演大会講演概要集, pp.3-4, (2020.10.28) (オンライン発表)	2020年10月28日	国内学会オンライン発表
学会発表	Fundamental study for long-distance noncontact shallow underground exploration technology by acoustic irradiation induced vibration	T.Sugimoto, K.Sugimoto, N.Utagawa, C.Kuroda	Proc. Symp. Ultrason. Elec., 2E1-1, 2pages (Distribution by USB memory), (2020.11.26, Online Meeting, Oral Presentation)	2020年11月26日	国内シンポジウムオンライン発表
学会発表	UAVからの音波照射加振による浅層地中探査技術のための基礎研究	杉本恒美, 杉本和子, 上地樹, 歌川紀之, 黒田千歳	物理探査学会第143回 (令和2年度秋季) 学術講演会論文集, pp.73-74 (2020.11.27) (オンライン発表)	2020年11月27日	国内学会オンライン発表
学会発表	Study on Buried Object Exploration in Shallow Underground Using Sound Waves	Y.Nakagawa, T.Sugimoto	14th Toin International Symposium on Biomedical Engineering, FE4, pp.108-109, (2020.11.28), Online Presentation	2020年11月28日	国内シンポジウムオンライン発表

学会発表	Research on Non-contact Acoustic Inspection Method Using Aerial Emission Sound Wave and Laser Doppler Vibrometer, - Examination of shallow underground inspection method using sound source mounted UAV -	I.Uechi, T.Sugimoto	14th Toin International Symposium on Biomedical Engineering, FE11, pp.124-125, (2020.11.28), Online Presentation	2020年11月28日	国内シンポジウム オンライン発表
学会発表	音波照射加振による非接触浅層地中探査法の基礎研究-関東ローム土を用いた場合-	杉本恒美, 杉本和子, 中川裕, 上地樹, 坂本憲昭, 高木均, 歌川紀之, 黒田千歳	音響春季講論集, 2-6-3, p77 pp.583-584, 2021.03.11 (オンライン発表)	2021年3月11日	国内学会 オンライン発表