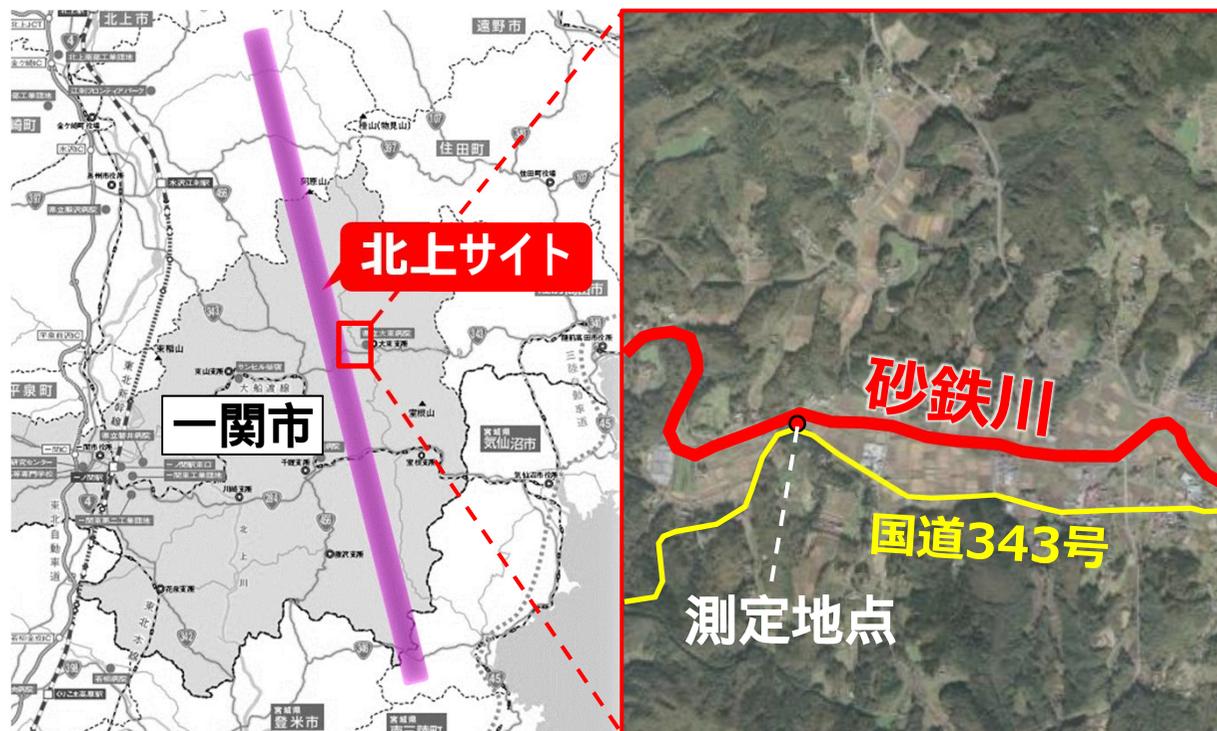


北上山地花崗岩体における 地中微振動測定

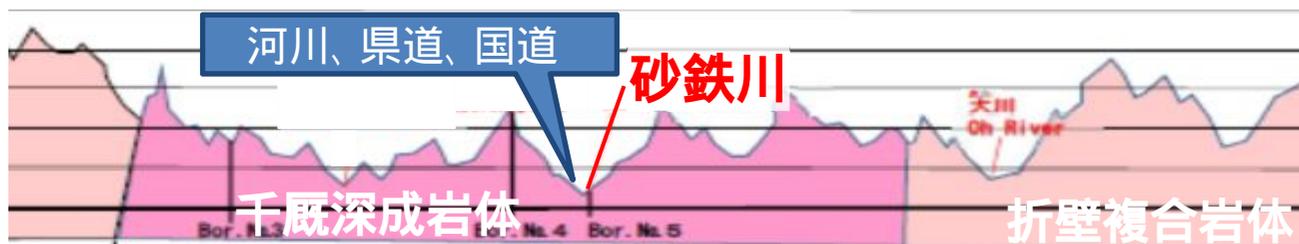
2019年 8月 2日

竹中工務店 ○松永裕樹、松下仁士、井上竜太、下河内隆文
東北大学 吉岡正和、佐貫智行、小貫勅子



出典) <http://fukushima-net.com/sites/content/1595>

出典) <https://map.yahoo.co.jp/maps>



出典) http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/011/158/20180921qa.pdf

河川があり、交通が多く、土被りが少ない地点に最も振動許容値の厳しい施設がある



**地表面で発生した交通振動がどの程度岩盤（花崗岩）に伝達するか確認するため
ボーリング調査・地中振動測定を実施**

1.2 測定地点

砂鉄川と国道343号線に挟まれた道路脇の空き地(待機所)にてボーリング調査、地中微動測定、及びトラックによる衝撃加振を実施



1.3 全体スケジュール

2018年

- ・10月17日（水） 現地入り、試掘（GL - 1.5m）
- ・10月18日（木） ボーリング用機材搬入 ~ GL - 3.5mまで掘削
センサを設置後、トラックによる衝撃加振
- ・10月19日（金）
~ 21日（日） 昼前 GL - 10mまで掘削
- ・10月21日（日） 昼前
~ 22日（月） 13時 トラックによる衝撃加振、及び24時間以上の微動測定

測定タイムスケジュール

| 月日 | 時刻 | 測定内容 | 地中加速度計深度 |
|--|---------------|-------------|----------|
| 10月18日（木） | 16:28 ~ 16:35 | トラックによる衝撃加振 | - 3.5m |
| 10月21日（日） 合間の時間は バッテリー交換 に要した時間 | 11:19 ~ 11:32 | トラックによる衝撃加振 | - 10m |
| | 11:58 ~ 12:59 | 微動測定 | |
| | 13:00 ~ 15:00 | | |
| | 15:04 ~ 16:26 | | |
| | 16:38 ~ 19:02 | | |
| | 19:09 ~ 20:59 | | |
| | 21:14 ~ 23:02 | | |
| 10月22日（月） | 23:09 ~ 3:01 | 微動測定 | - 10m |
| | 3:06 ~ 7:01 | | |
| | 7:07 ~ 10:36 | | |
| | 10:51 ~ 11:38 | | |
| | 11:39 ~ 13:00 | | |

2.1 ボーリング調査等の写真

17日に GL - 1.5mまで**手掘り**で試掘し、18日に機材（ボーリングマシン）搬入、掘削開始



17日：施工前



17日：試掘完了（深度GL - 1.5m）



18日：機材搬入状況



18日：仮設状況

2.2 ボーリング調査等の写真

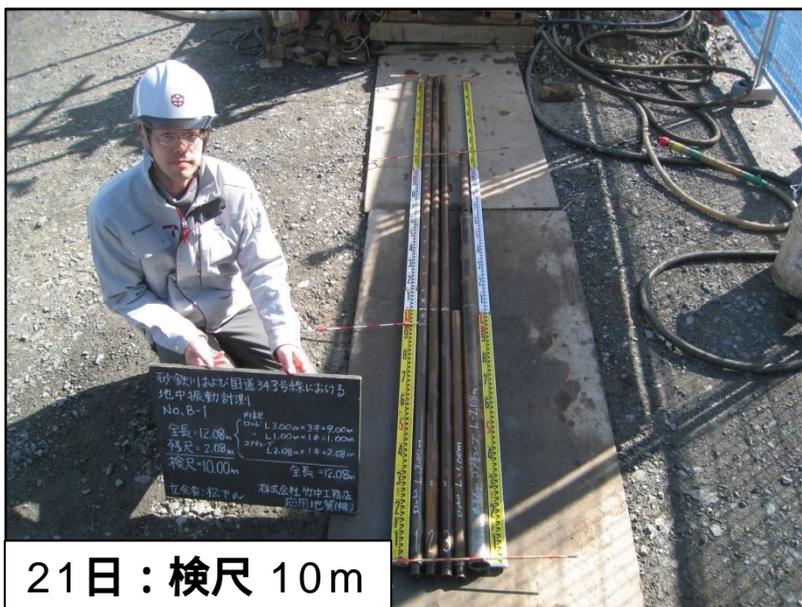
18日にGL - 3.5mまで掘削

以降、21日昼前までかかって GL - 10m まで掘削

18日：GL - 3.5mまで掘削



21日：GL - 10mまで掘削



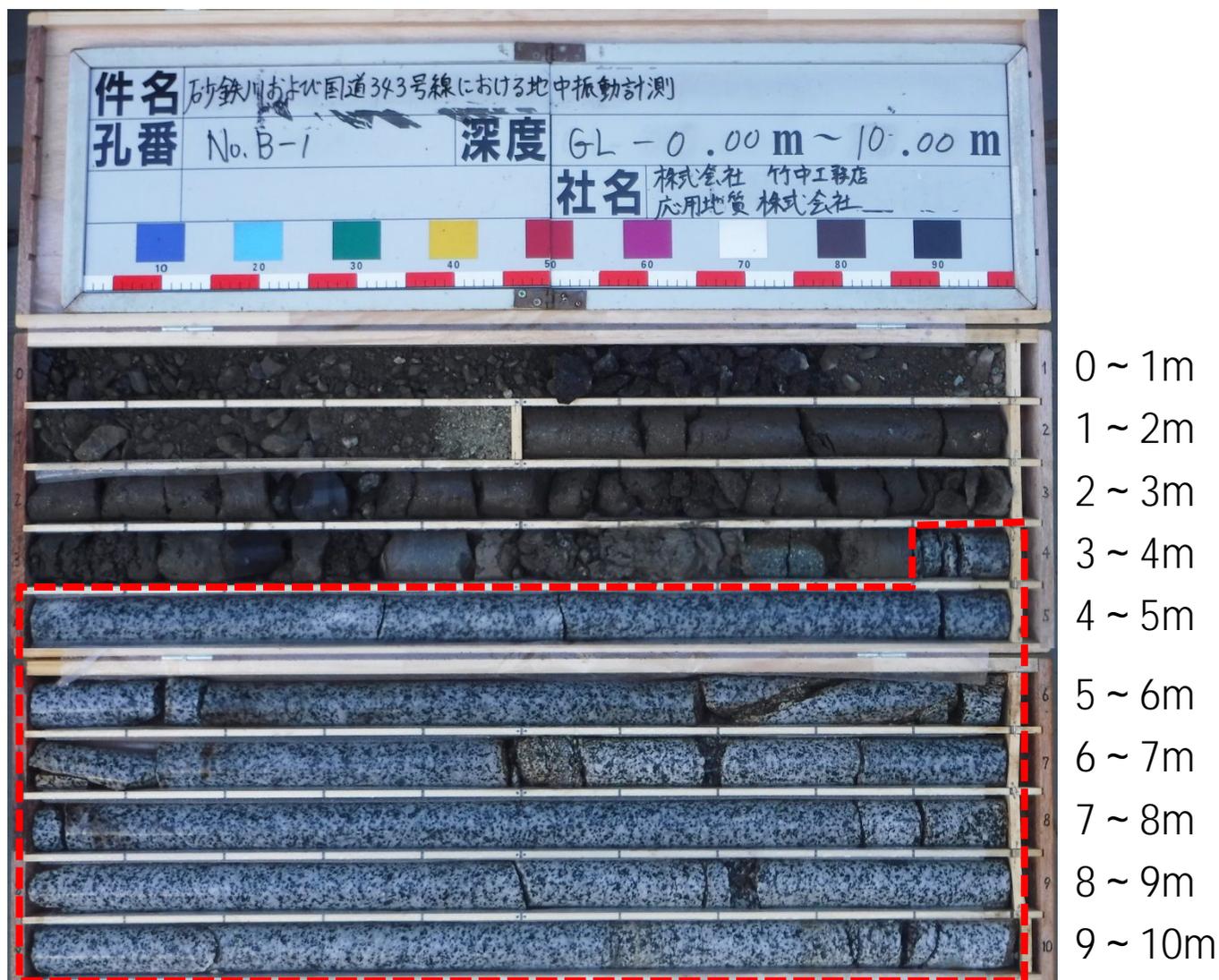
21日：検尺 10m



21日：コア採取

2.3 ボーリングコア

GL - 4m手前から花崗岩が出始め、当初予定していたGL - 10mまで花崗岩が続いた



花崗閃緑岩

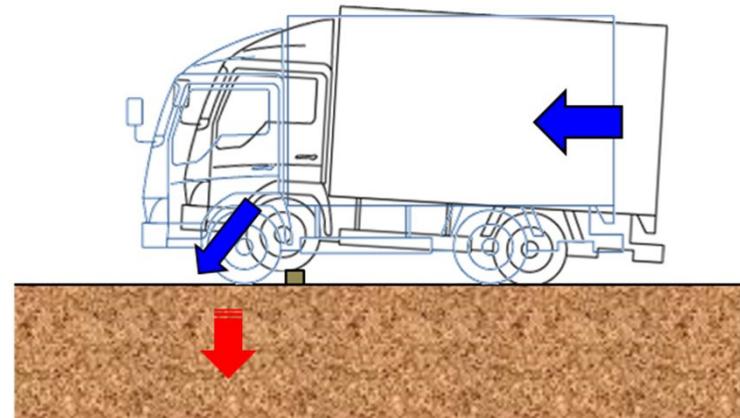
3.1 センサの仕様

応用地質(株)保有の埋設型の加速度計(SV355R)を2台使用



| 装置 | 名称 | 機能・規格 | 製作所名 | 台数 |
|---------|--------|---|------|----|
| 加速度型地震計 | SV355R | <ul style="list-style-type: none">・フィードバック方式サーボ型加速度計・測定周波数:DC~100Hz・成分:<u>水平2成分,上下1成分</u>・感度:5 mV /100 gal・耐水圧:30kgf/cm²・ケーブル長:最大150m・大きさ:φ57 mm,長さ 309 mm | 東京測振 | 2 |

3.2 センサ設置状況等 (18日 GL - 3.5m掘削後)



3.3 センサ設置状況等 (21日 GL - 10m掘削後)



21日：-10m掘削後 地中加速度計設置



21日：地表加速度計設置



21日：トラック加振状況 (2回目)



21日：データ確認状況

4.1 微動測定データの分析時刻

交通振動の大きい時間帯について

全体的に振動が大きかった以下の時間帯を代表的なデータとして示す

- ・10月22日(月) 9時37分～ 9時52分

静かな時間帯について

車両交通が無かった以下の時間帯を代表的なデータとして示す

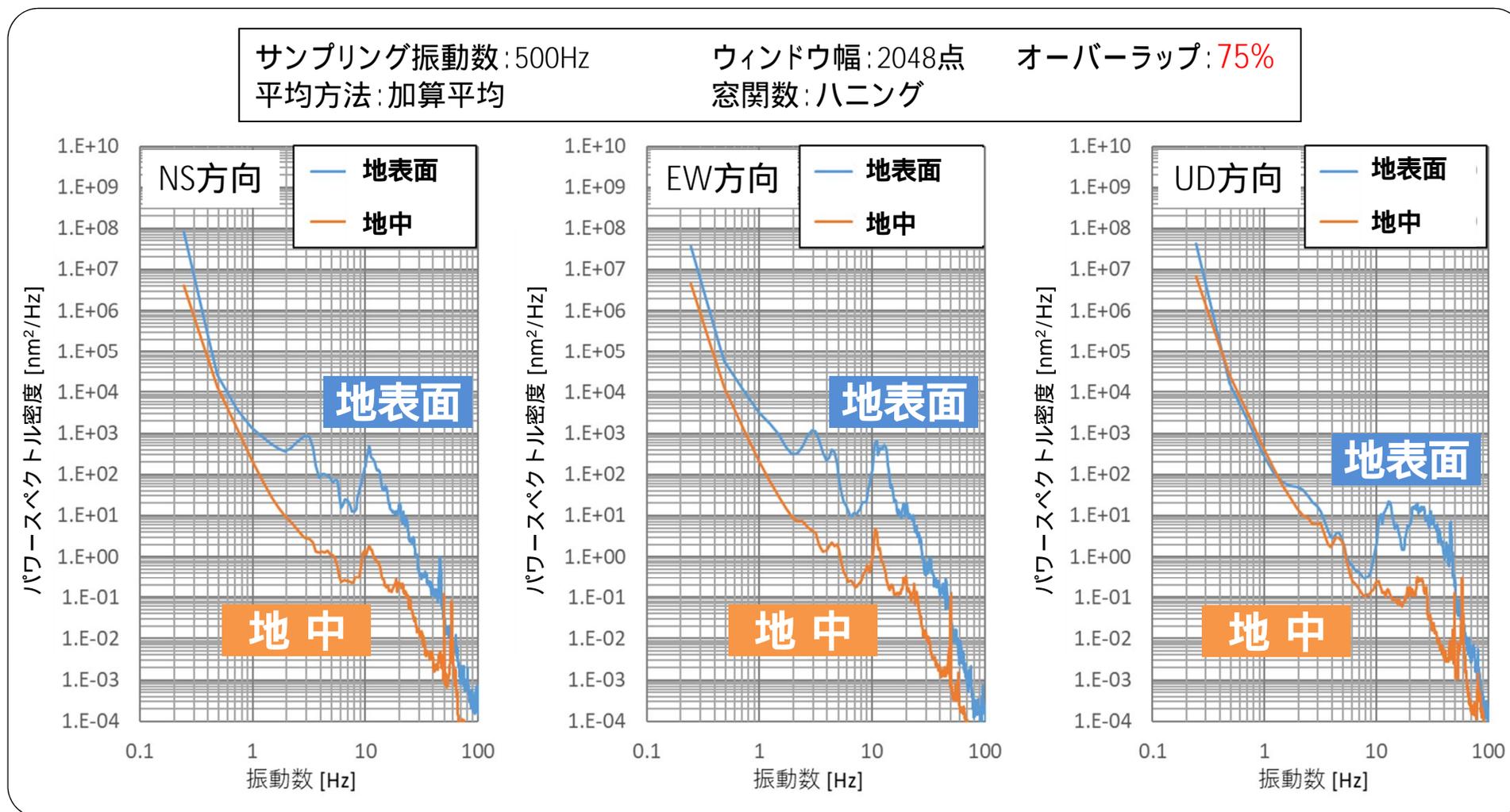
- ・10月22日(月) 午前 1時39分～ 1時49分

| 月日 | 時刻 | 測定内容 | 地中加速度計深度 |
|-----------|---------------|-------------|----------|
| 10月18日(木) | 16:28 ~ 16:35 | トラックによる衝撃加振 | - 3.5m |
| 10月21日(日) | 11:19 ~ 11:32 | トラックによる衝撃加振 | - 10m |
| | 11:58 ~ 12:59 | 微動測定 | |
| | 13:00 ~ 15:00 | | |
| | 15:04 ~ 16:26 | | |
| | 16:38 ~ 19:02 | | |
| | 19:09 ~ 20:59 | | |
| | 21:14 ~ 23:02 | | |
| | 23:09 ~ 3:01 | | |
| 10月22日(月) | 3:06 ~ 7:01 | 微動測定 | - 10m |
| | 7:07 ~ 10:36 | | |
| | 10:51 ~ 11:38 | | |
| | 11:39 ~ 13:00 | | |

上記時間帯について、FFT分析(加算平均)を行った結果を順に示す

4.2 FFT分析結果：交通振動の大きい時間帯

10月22日9時37分～52分のパワースペクトル密度を示す

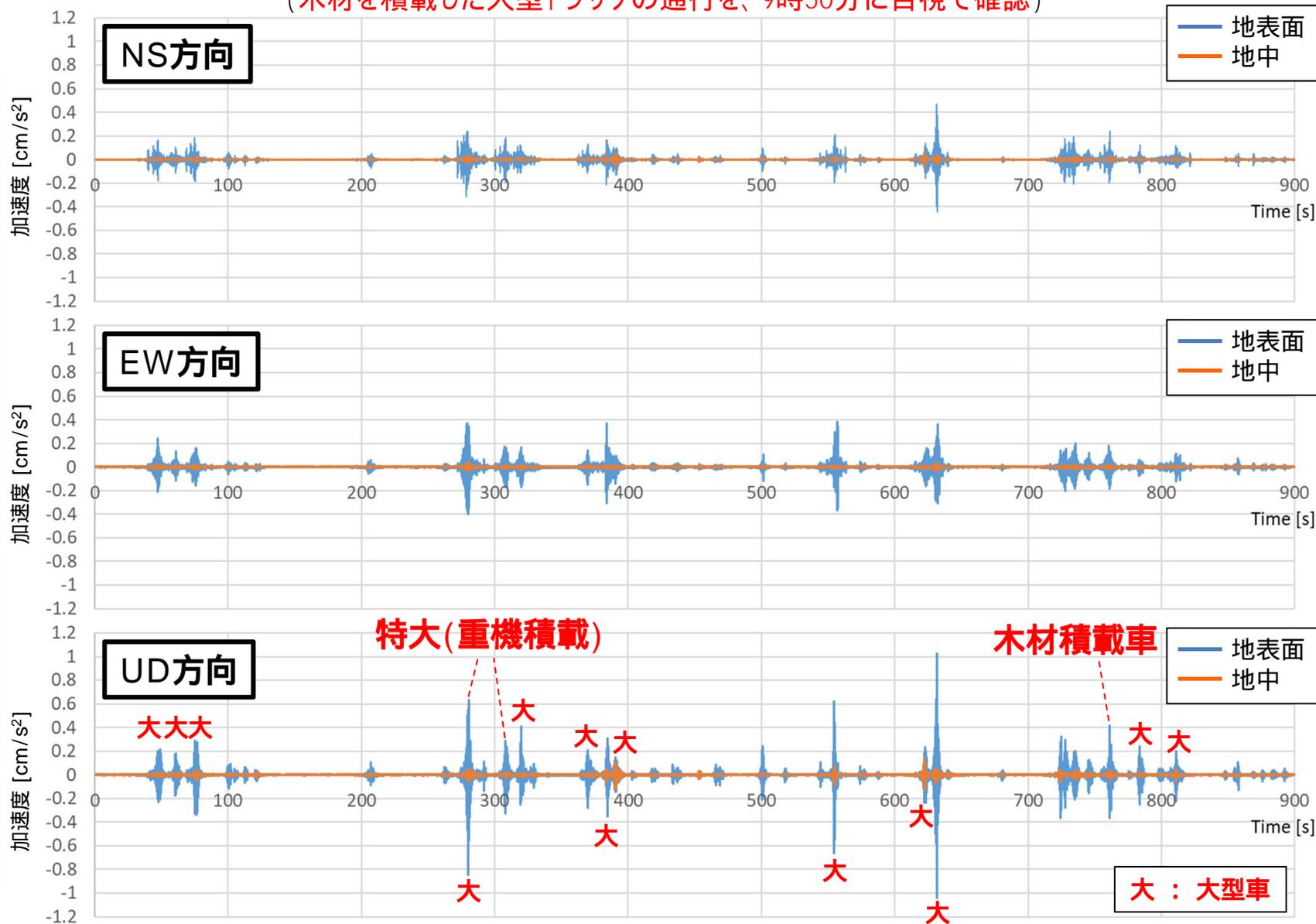


地表面では水平振動が大きい。地中では全方向とも同程度に小さい値となっている。

4.2 加速度波形：交通振動の大きい時間帯

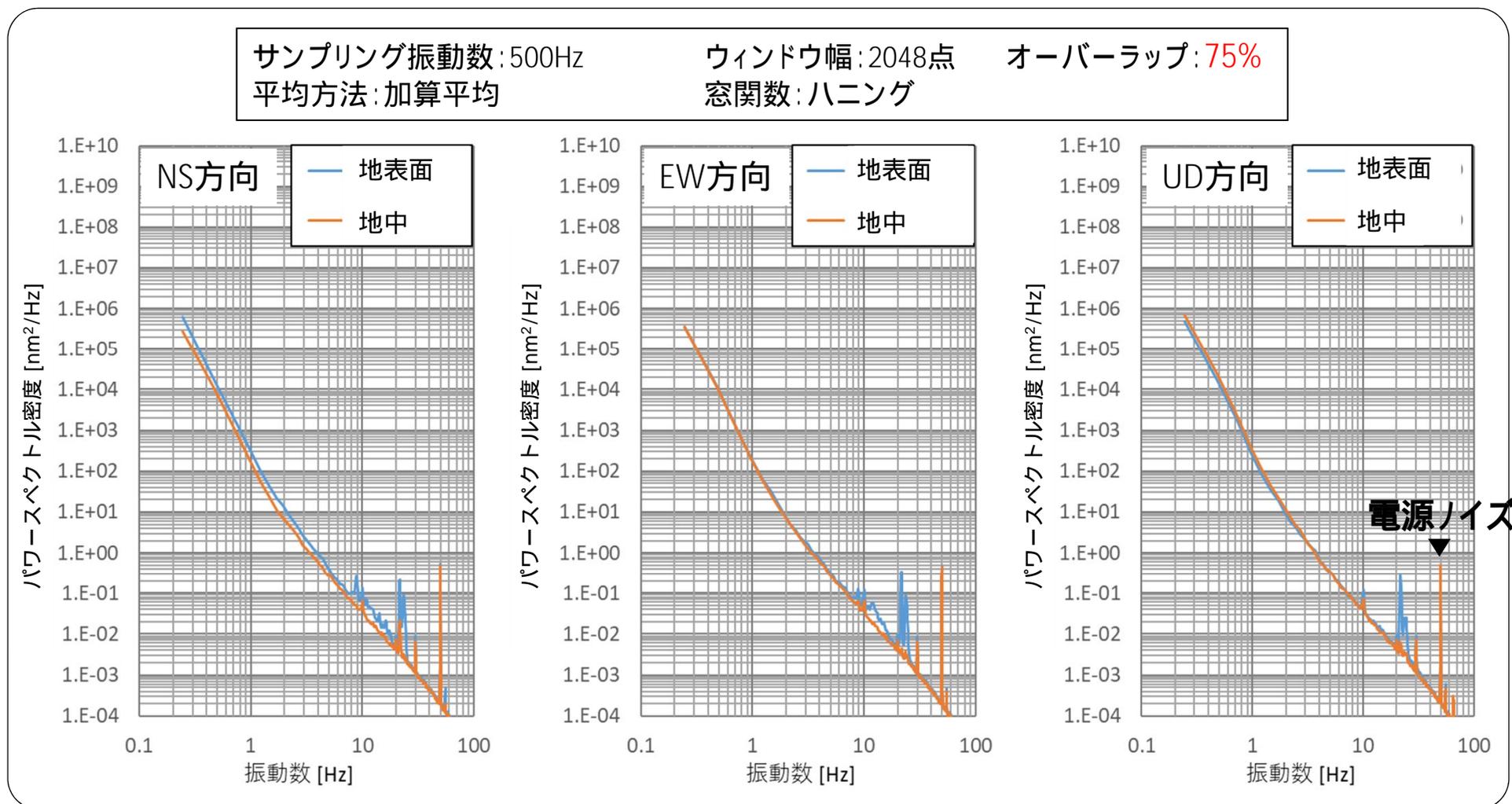
10月22日9時37分～52分の加速度波形を各方向、地表と地中で重ねて示す

(木材を積載した大型トラックの通行を、9時50分を目視で確認)



4.3 FFT分析結果：静かな時間帯

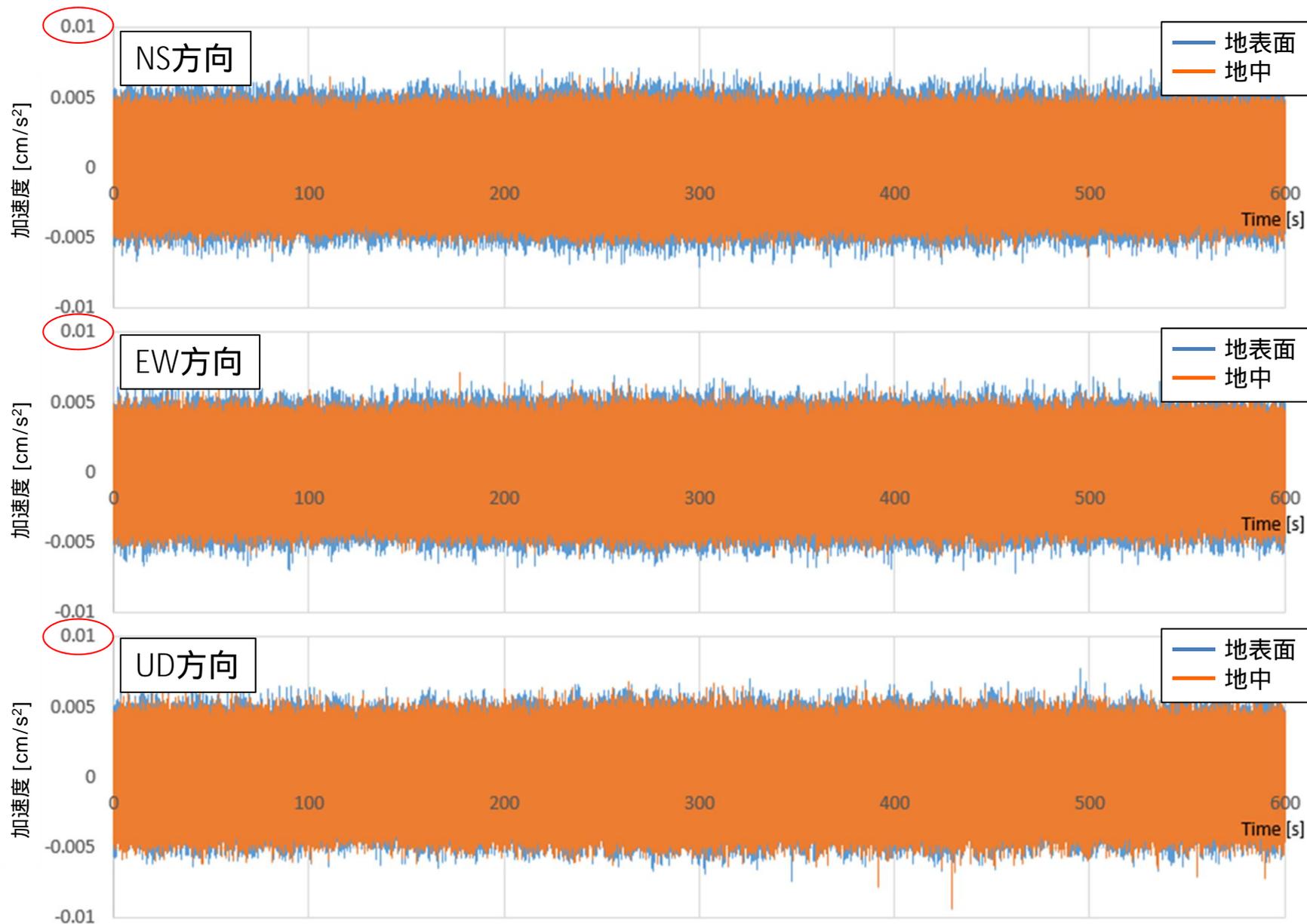
10月22日1時39分～49分のパワースペクトル密度を示す



地表面と地中でほぼ同値であり、センサ分解能以下の極めて静かな振動環境だった

4.3 加速度波形：静かな時間帯

10月22日1時39分～49分の加速度波形を各方向、地表と地中で重ねて示す



4.4 地中加速度計の積分変位 (@1Hz)

ILCでは、変位振幅スペクトルを 50Hz 1Hzまで積分する「積分変位」でエリアごとにUD方向の振動許容値が設定されており、最も厳しいエリアは「10nm@1Hz」である



振動の大きい時間帯、および夜間の静かな時間帯について、地中加速度計の変位振幅スペクトルから求めた1Hzの積分変位を示す

積分変位 (@1Hz)

| 振動の大きい時間帯 | NS方向 | EW方向 | UD方向 | |
|-------------|--------|--------|--------|-------------|
| 22日 9時37分 ~ | 13.5nm | 13.6nm | 14.6nm | > 10nm @1Hz |

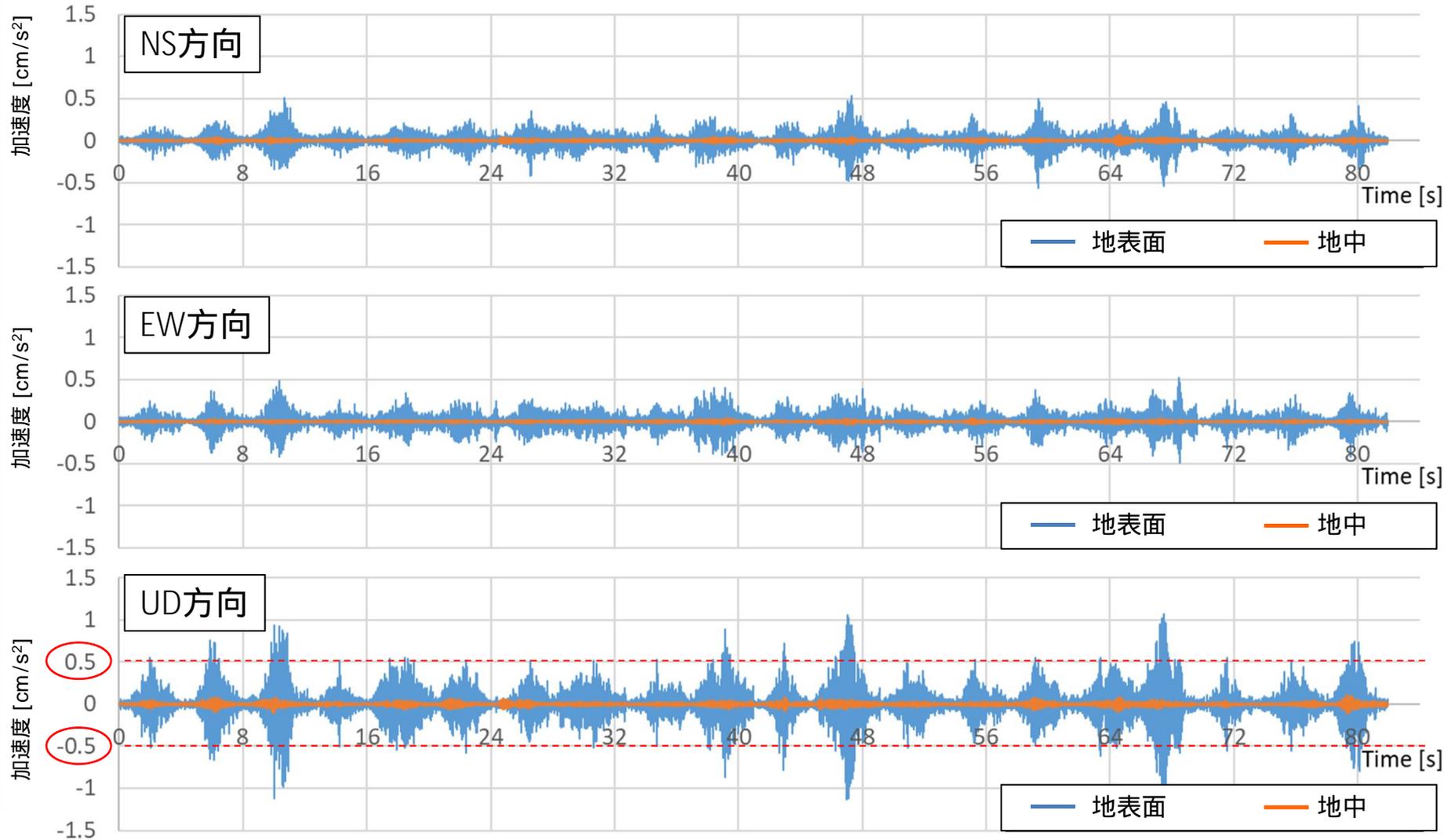
| 静かな時間帯 | NS方向 | EW方向 | UD方向 | |
|-------------|-------|-------|-------|-------------|
| 22日 1時39分 ~ | 7.3nm | 7.4nm | 9.2nm | < 10nm @1Hz |



振動の大きい時間帯については、15分間の平均で評価しているため更に厳しい条件として、大型車両が通行した瞬間の波形だけを対象とした評価も実施

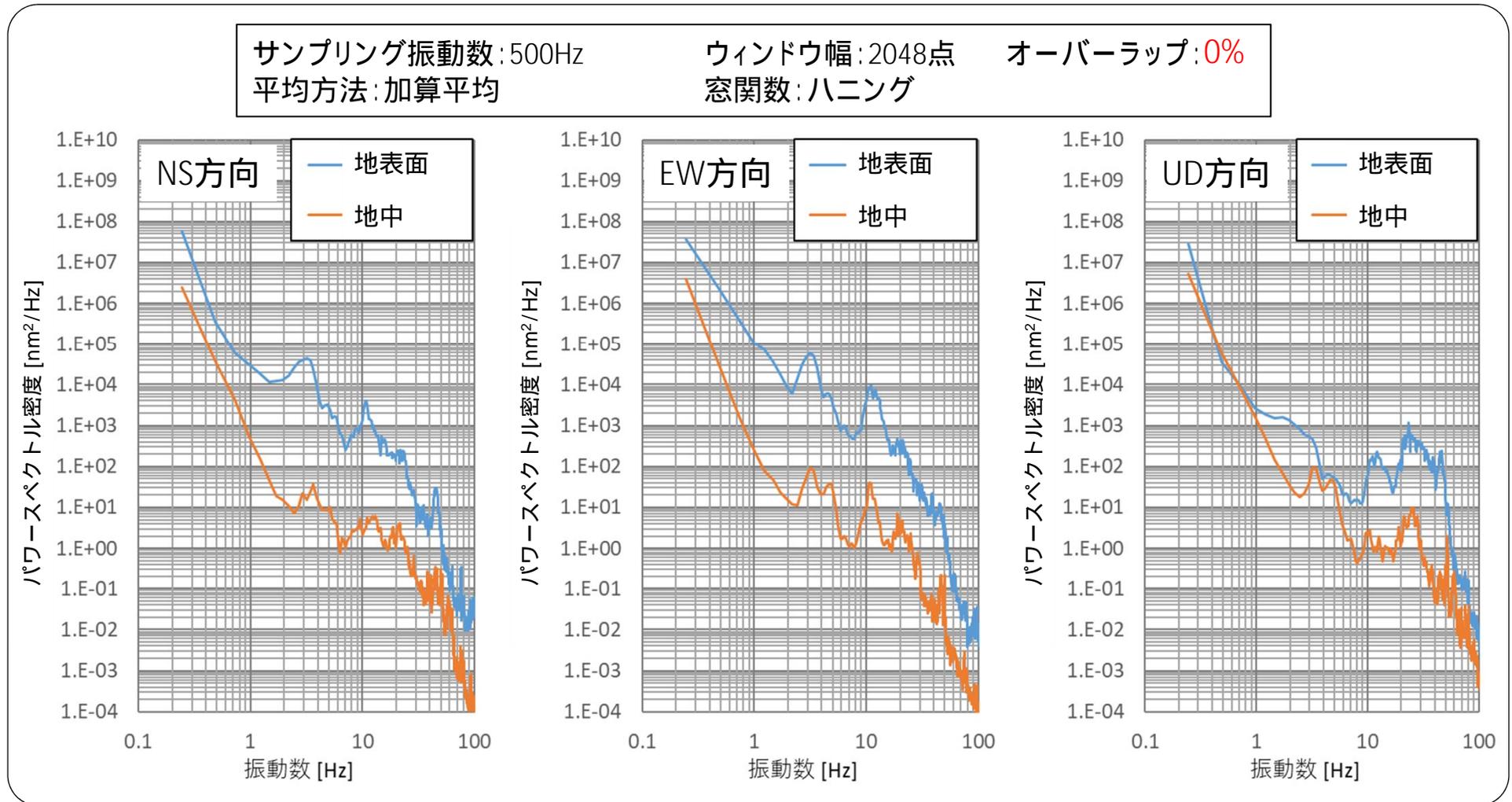
4.5 車両通行時のみの加速度波形分析

車両通行時に地表面UD方向加速度 0.5 cm/s^2 以上の波形 (2048点、4.096s) 20波を取得 (10月22日7時~13時の間のデータから取得)



4.5 車両通行時20波：FFT分析結果

車両通行時20波のパワースペクトル密度を示す



車両通行時の地中UD方向の積分変位は **43.7nm** となった (15分間平均は **14.6nm**)
次に、ILC施設床面のGL - 16mに対して、車両通行時の振動伝搬量を予測する

5.1 地中の振動伝達率推定：トラック衝撃加振

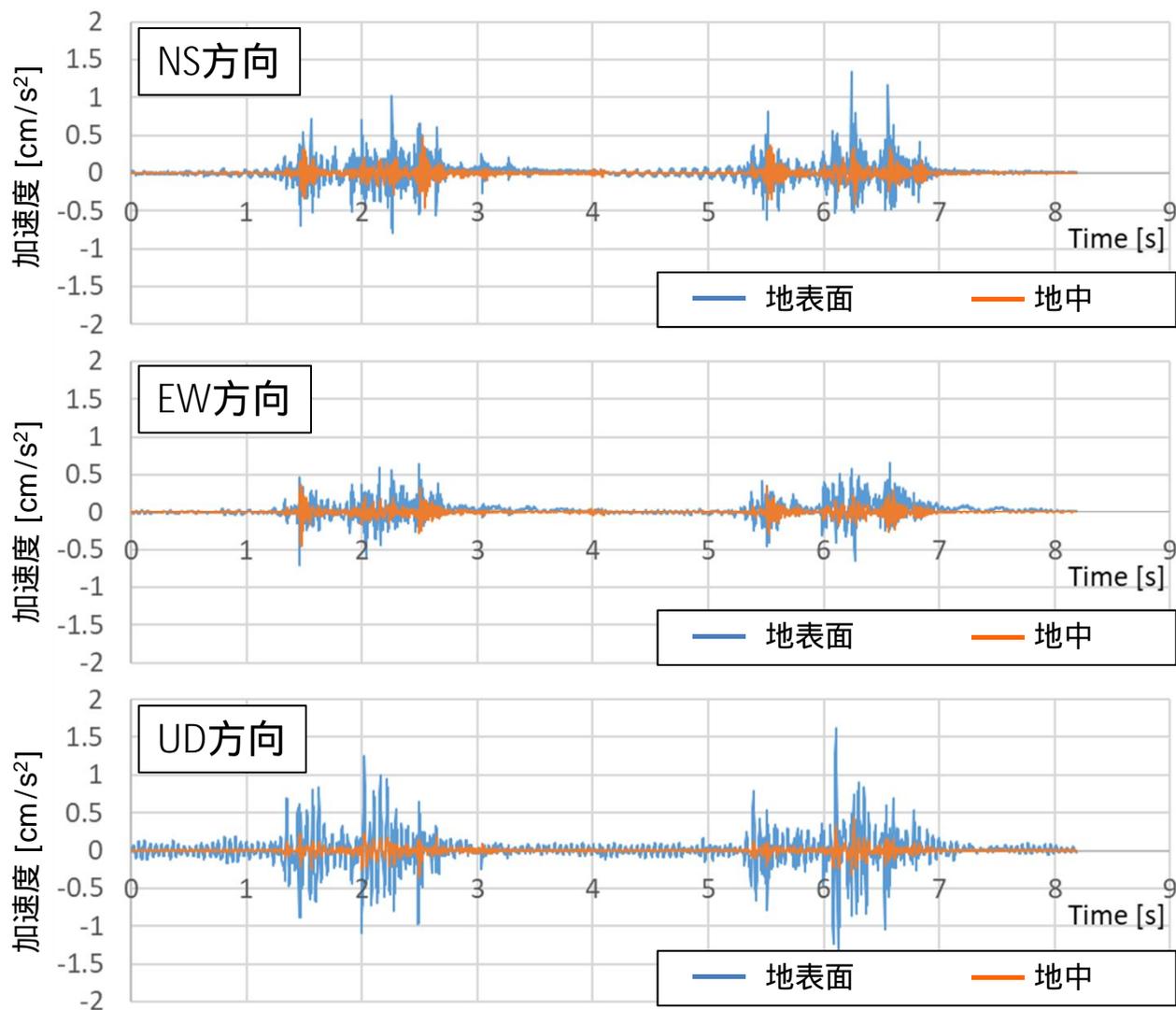
GL - 3.5m掘削時、及びGL - 10m掘削時にトラック衝撃加振を実施

The diagram on the left illustrates the experimental setup. A truck is shown on the ground surface (GL) with a red arrow indicating an impact. Two sensors are placed at different depths: one at GL - 3.5m and another at GL - 10m. A dashed red arrow shows the vibration wave propagating downwards from the surface sensor to the 10m sensor, and a red arrow with question marks points to a sensor at GL - 16m. The ground is labeled as '花崗閃緑岩' (Granite/Gneiss). To the right, two photographs show the truck at the site. The top photo, dated '18日', shows the truck on the first day of measurement. The bottom photo, dated '21日', shows the truck on the second day. A sign in front of the truck in both photos provides details about the project and the measurement point.

地表面センサ 地中センサへの振動伝達率算出のため、加振の瞬間の波形を取得

5.2 分析対象の加速度波形： - 3.5m地点

適切に測定できた2回分の加振データについて分析を実施
1加振 2048点(4.096秒)のデータを切り出し、2加振分の波形を繋げたものを示す

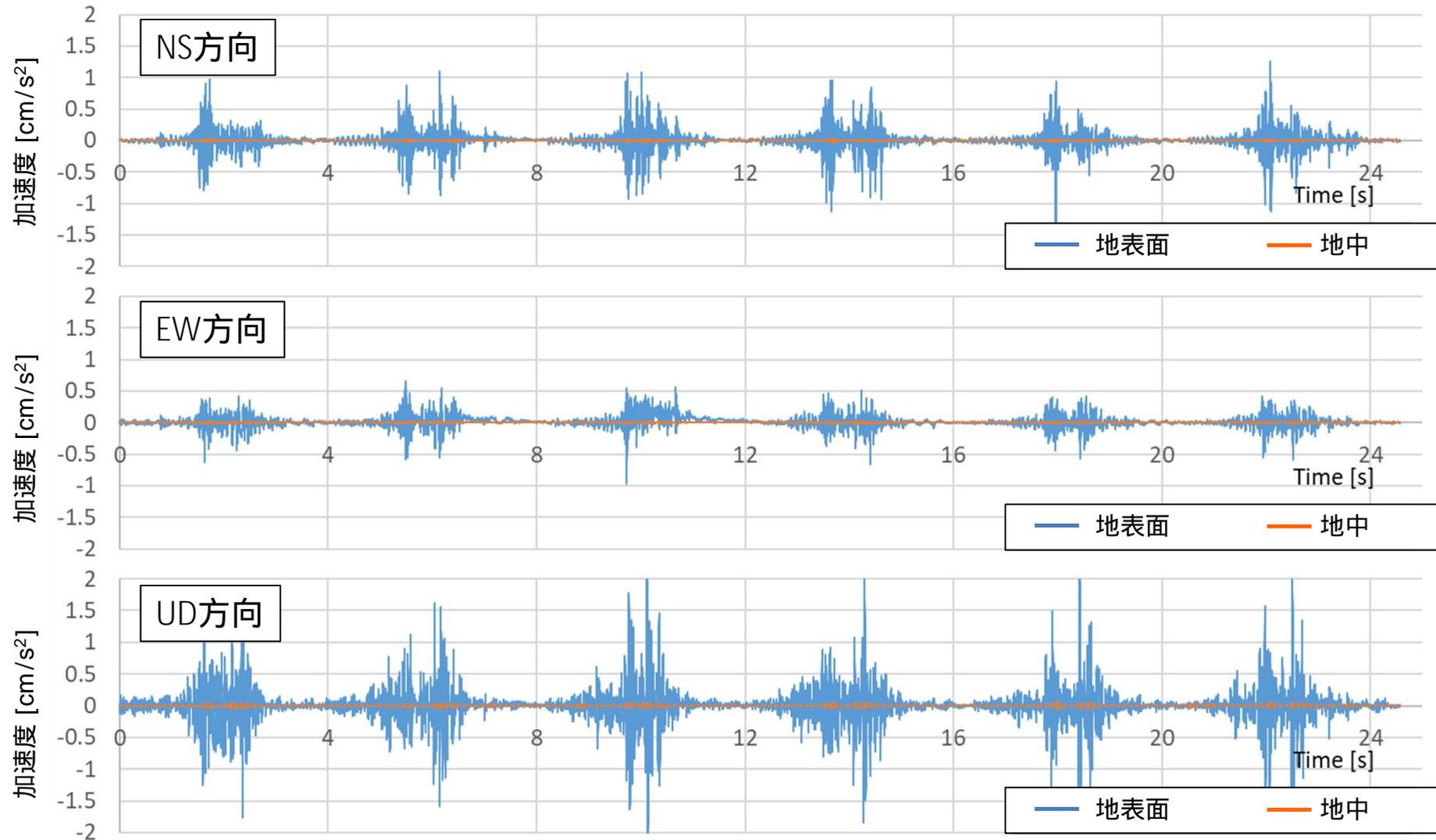


地表面 **地中へ至る過程で、振動は大きく低減している**

5.3 分析対象の加速度波形： - 10m地点

適切に測定できた6回分の加振データで分析実施。

1加振 2048点 (4.096秒) のデータを切り出し、2加振分の波形を繋げたものを示す。

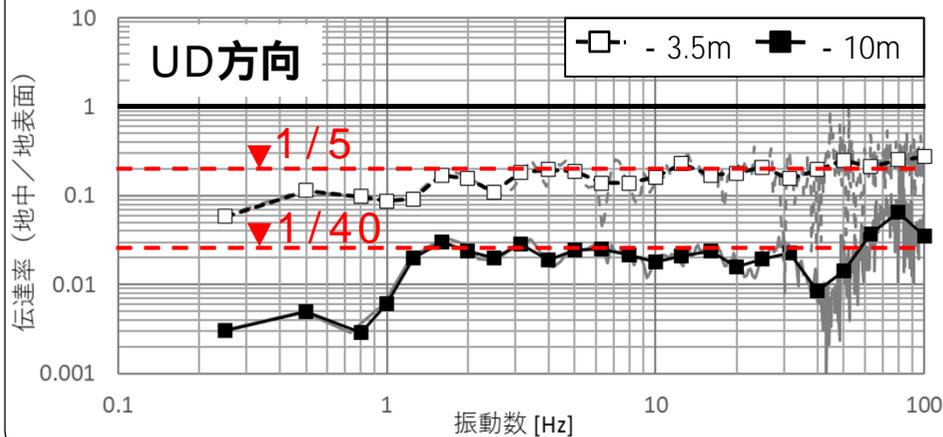
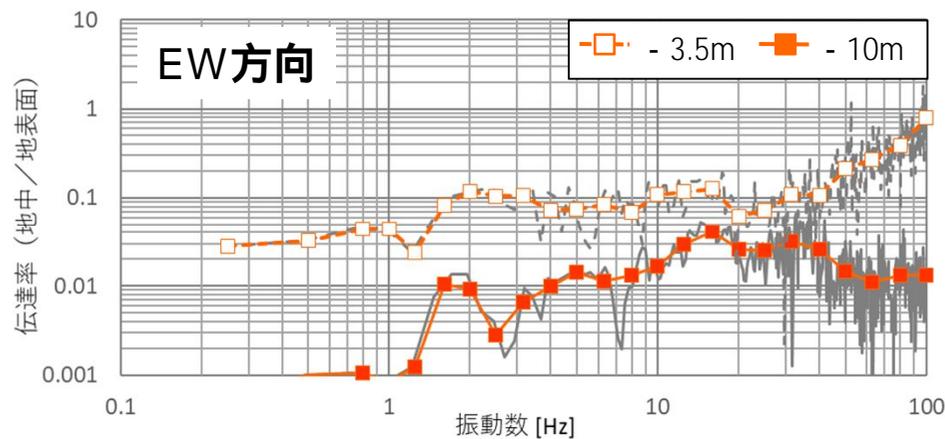
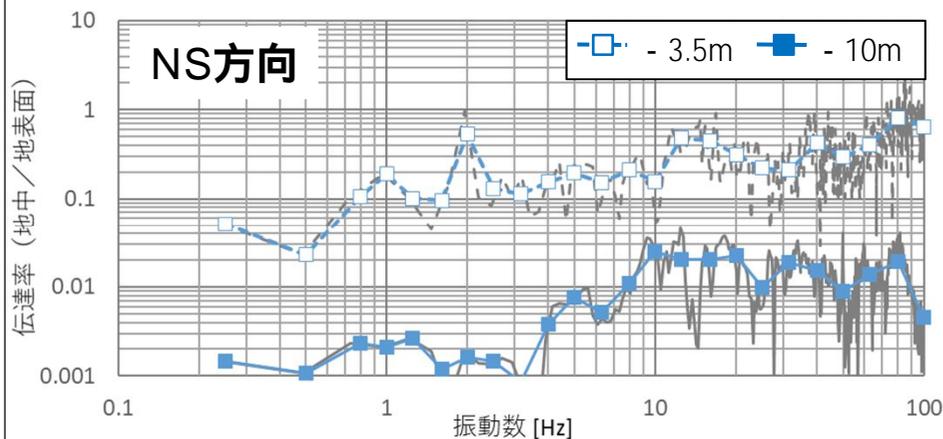


- 3.5 m よりもさらに地中での振動が小さくなっている

5.4 地表面 地中への振動伝達率

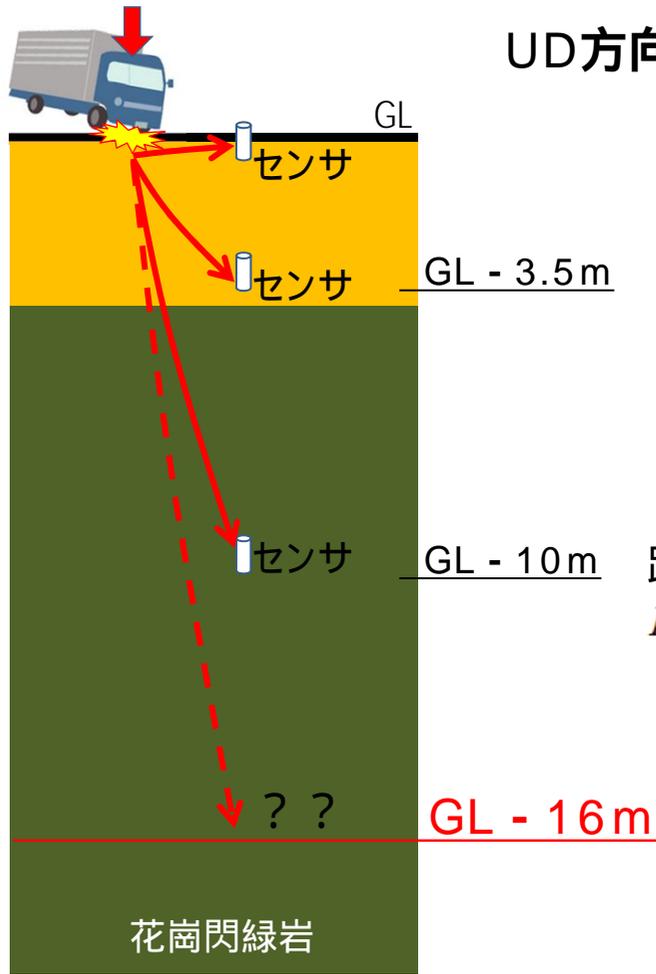
FFTの過程で「GL - 3.5m / 地表面」、及び「GL - 10m / 地表面」の演算を行い伝達率を算出
対数軸上で 1Hz以降等間隔となるよう 1/3オクターブバンド中心周波数ごとに平均処理

サンプリング振動数:500Hz ウィンドウ幅:2048点 オーバーラップ:0% 平均方法:加算平均 窓関数:ハニング

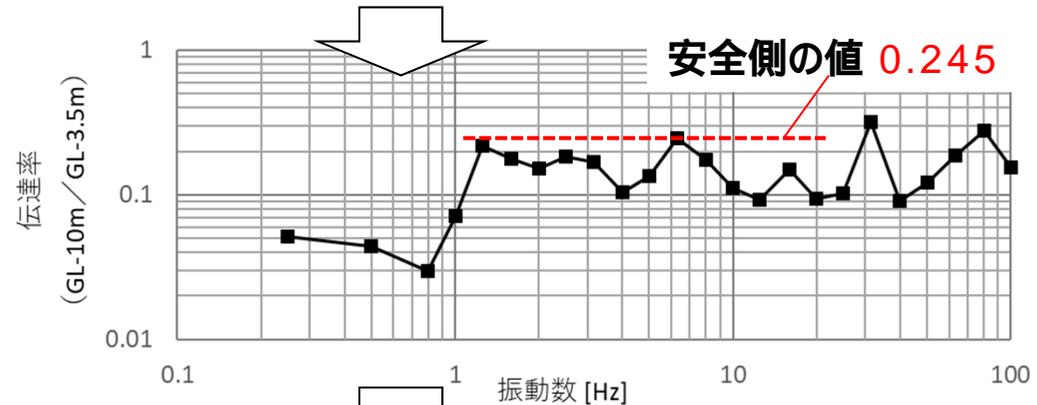


UD方向では - 3.5m地点で約1/5 , - 10m地点で約1/40

5.5 ILC施設床レベル(-16m)の振動予測



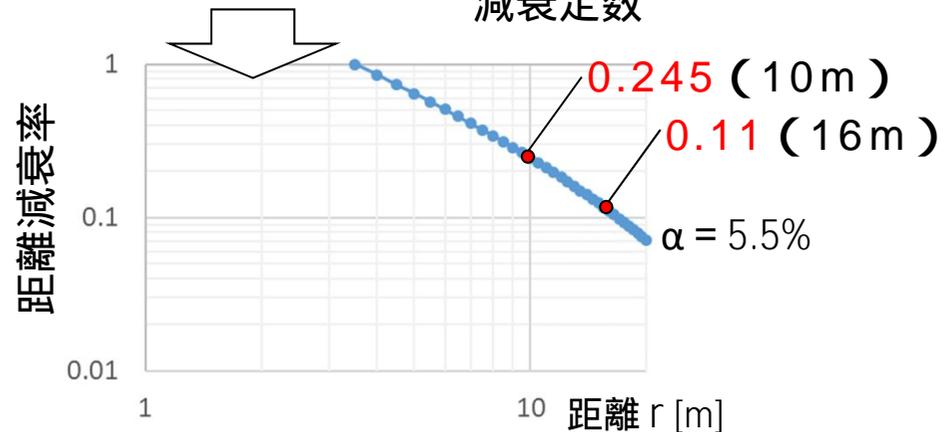
UD方向の伝達率について、「GL - 10m / GL - 3.5m」の値を算出



距離減衰式

$$L(r) = L(r_0) - 20 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) - 8.68 \cdot \alpha \cdot (r - r_0)$$

で、 $r_0 = 3.5\text{m}$ 、 $n = 1.0$ として
減衰定数



- ・減衰定数を安全側(= 5.5%)と見込むと、 - 10m - 16mで45%に減衰
- ・積分変位は、車両走行時：43.7nm 19.6nm
15分平均：14.6nm 6.6nm < 10nmに減衰すると予測される

ボーリング調査結果について

- ・GL - 4m程度以深が花崗閃緑岩であることを確認

微動測定結果について

- ・GL - 10m地点において振動の大きい時間帯では、鉛直方向の積分変位が15分平均で 14.6nm@1Hz、大型車両通行の瞬間で 43.7nm@1Hz であった。
(ただし、平日午前中でも交通量は多くはなく、大型車は 1台 / 分 程度の頻度で通行)

トラック衝撃加振結果について

- ・GL - 10m GL - 16m地点に至るまでに振動量は 0.45倍以下になると推測される。

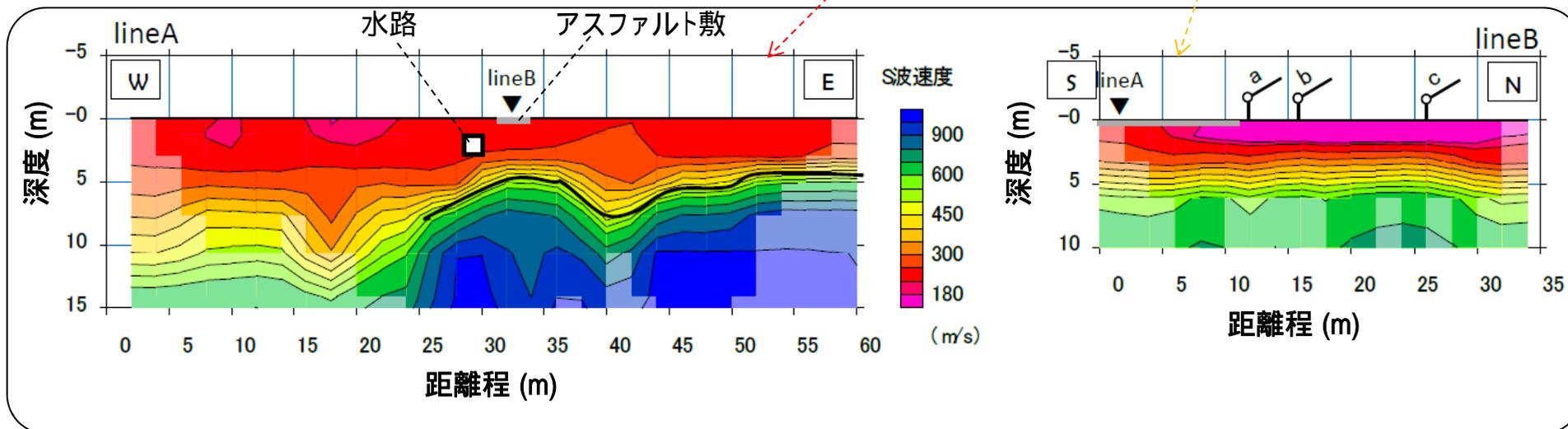
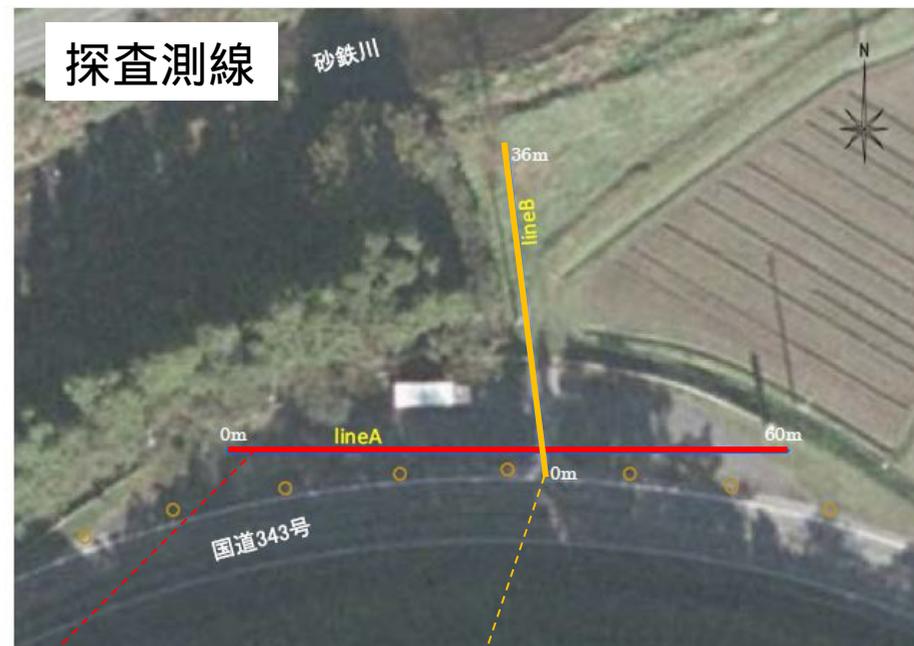


GL - 16mの地点では、少なくとも 20nm@1Hz 未満の振動スペックを常時満足できる

End

付2. 表面波探査

- ・砂鉄川付近の国道343号線沿いの待機所にて表面波探査を実施
- ・岩盤(花崗岩)の出始める深度を確認し、ボーリング位置を選定



lineA の 45 ~ 50m 地点をボーリング位置とした

付3 . 測定期間中の地震情報

10月18日の16時前後、及び10月21日12時～22日13時までの間、大きな地震、及び一関近辺での震度1以上の地震は観測されていない

| ▼ 発生時刻 | 情報発表時刻 | 震源地 | マグニチュード | 最大震度 |
|----------------------|--------------------|--------|---------|------|
| 2018年10月22日 13時05分ごろ | 2018年10月22日 13時08分 | 和歌山県北部 | 3.2 | 1 |
| 2018年10月22日 8時48分ごろ | 2018年10月22日 8時51分 | 日高地方東部 | 3.9 | 2 |
| 2018年10月22日 5時00分ごろ | 2018年10月22日 5時03分 | 千葉県北東部 | 3.0 | 1 |
| 2018年10月21日 20時02分ごろ | 2018年10月21日 20時06分 | 千葉県東方沖 | 4.4 | 3 |
| 2018年10月21日 12時17分ごろ | 2018年10月21日 12時20分 | 千葉県東方沖 | 3.7 | 2 |
| 2018年10月21日 7時17分ごろ | 2018年10月21日 7時20分 | 山口県北部 | 3.1 | 2 |
| 2018年10月18日 20時04分ごろ | 2018年10月18日 20時07分 | 滋賀県北部 | 3.4 | 2 |
| 2018年10月18日 14時28分ごろ | 2018年10月18日 14時31分 | 三重県中部 | 2.6 | 1 |

付4 . 振動センサの種類

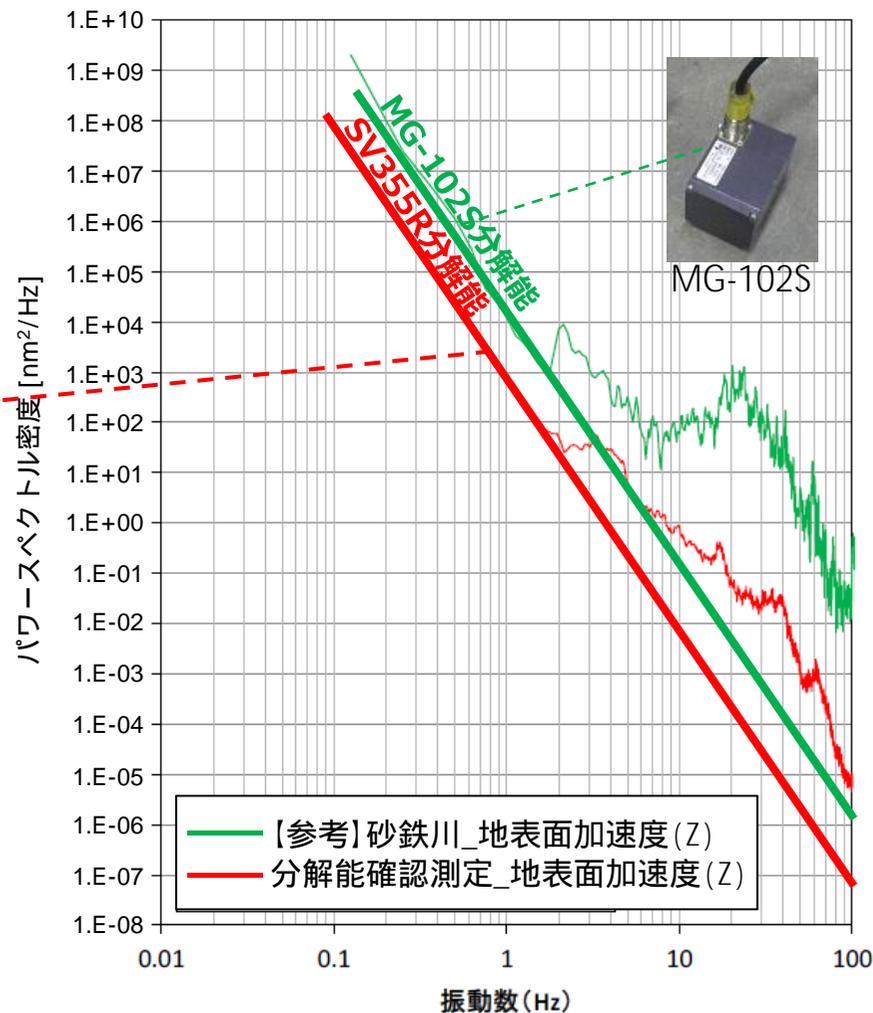
| | 速度計 | | 加速度計 | | |
|------|---|---|---|---|---|
| | Trillium | VSE-15D | MG-102S | SV355R | PV-91C |
| |  |  |  |  |  |
| メーカー | ナノメトリクス社 | 東京測振 | 特許機器 | 東京測振 | リオン |
| 方式 | サーボ式 | サーボ式 | サーボ式 | サーボ式 | 圧電式 |
| 分解能 | | ○ | ○ | ? | ○ |
| 防水性 | × | × | × | ○ | × |
| 埋設 | × | × | × | ○ | × |
| 総合評価 | | × | × | ? | × |

地下水の出る孔中に対応可能な埋設型の加速度計 (SV355R) を候補とした

埋設型のSV355R（サーボ式）と加速度計MG-102S（サーボ式）の分解能を比較



SV355Rの分解能確認測定
(応用地質(株)の計測システム事業部で実施)



パワースペクトル密度の比較

他の加速度計と比較しても分解能が高いため（実質3～4倍）採用