

北上山地花崗岩体における 地中微振動測定

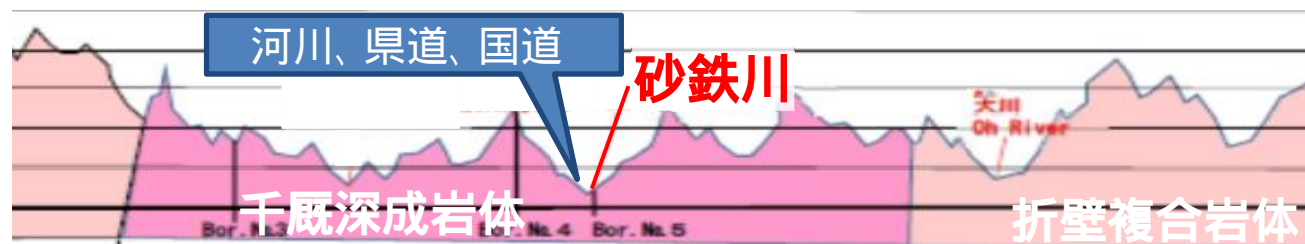
2019年 8月 2日

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

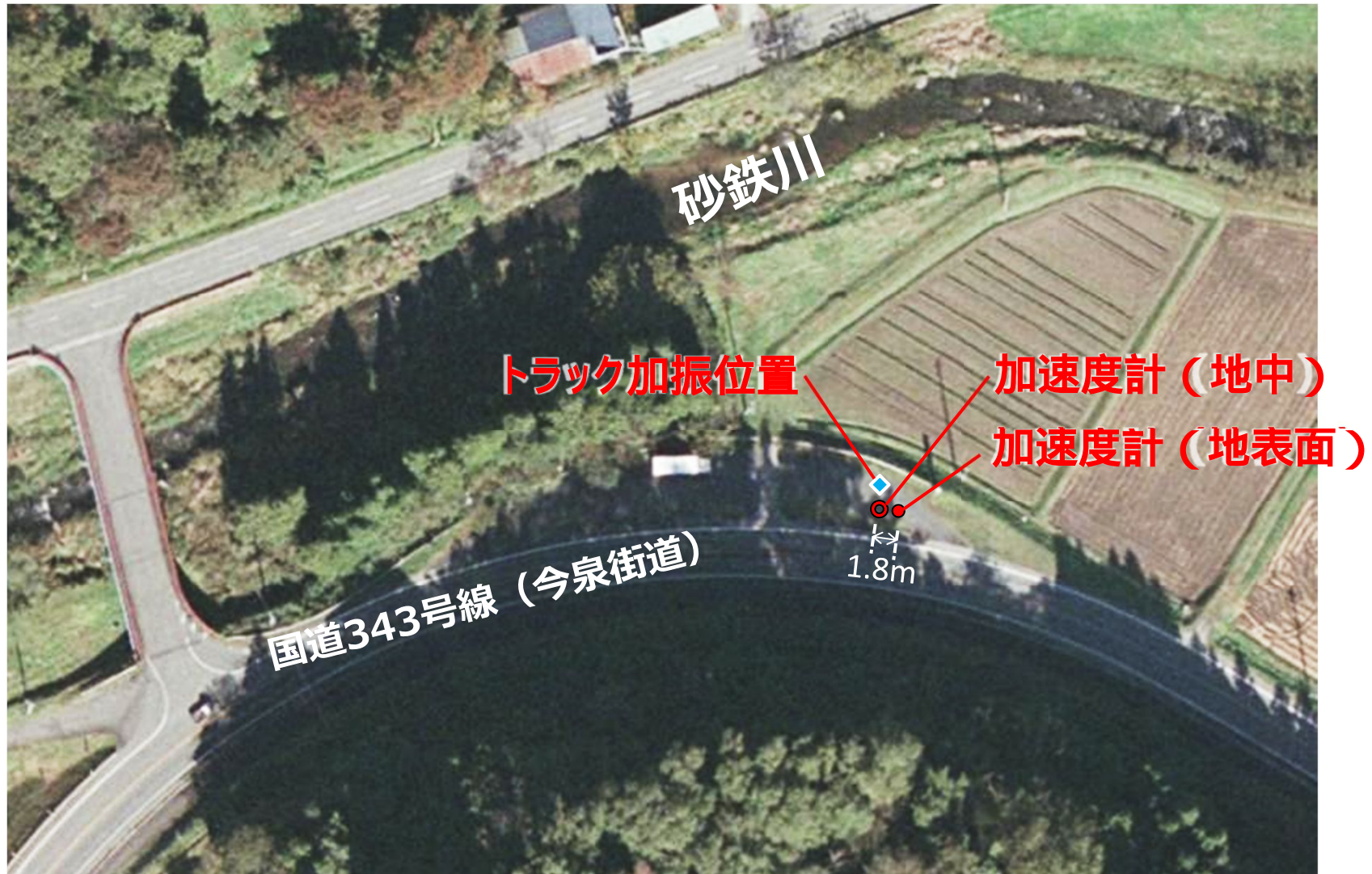
河川があり、交通が多く、土被りが少ない地点に最も振動許容値の厳しい施設がある



**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



2.2 ボーリング調査等の写真

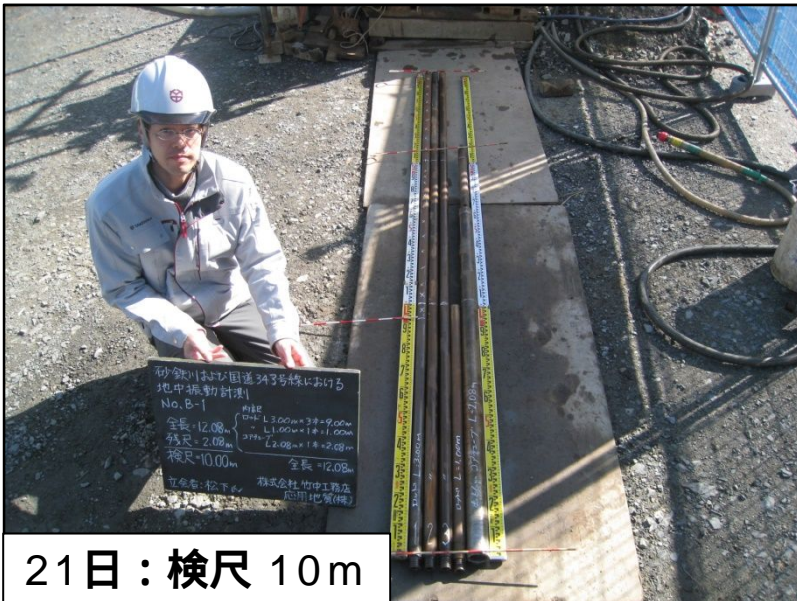
18日にGL - 3.5mまで掘削

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



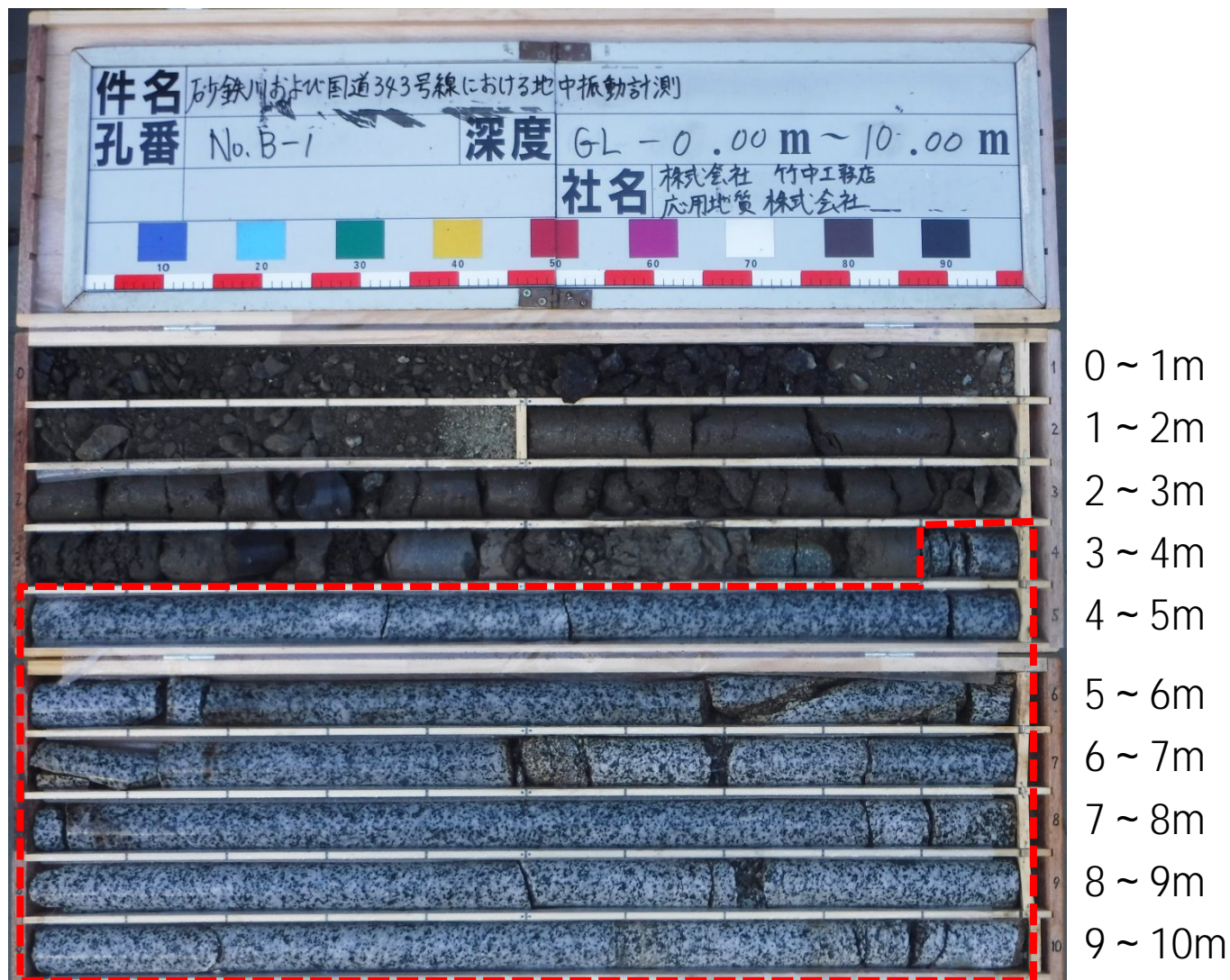
21日：検尺 10m



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

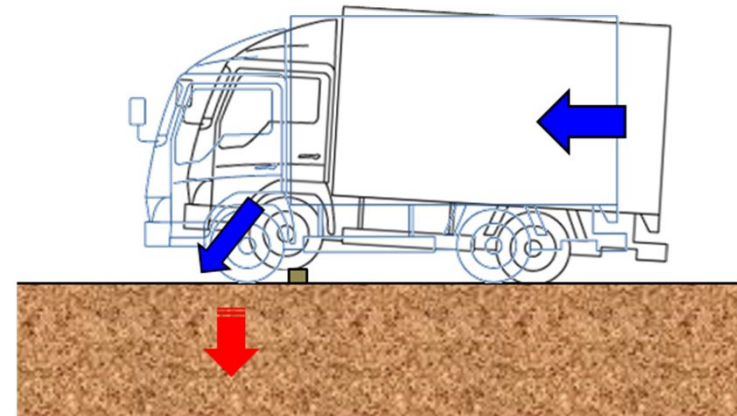
3.1 センサの仕様

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

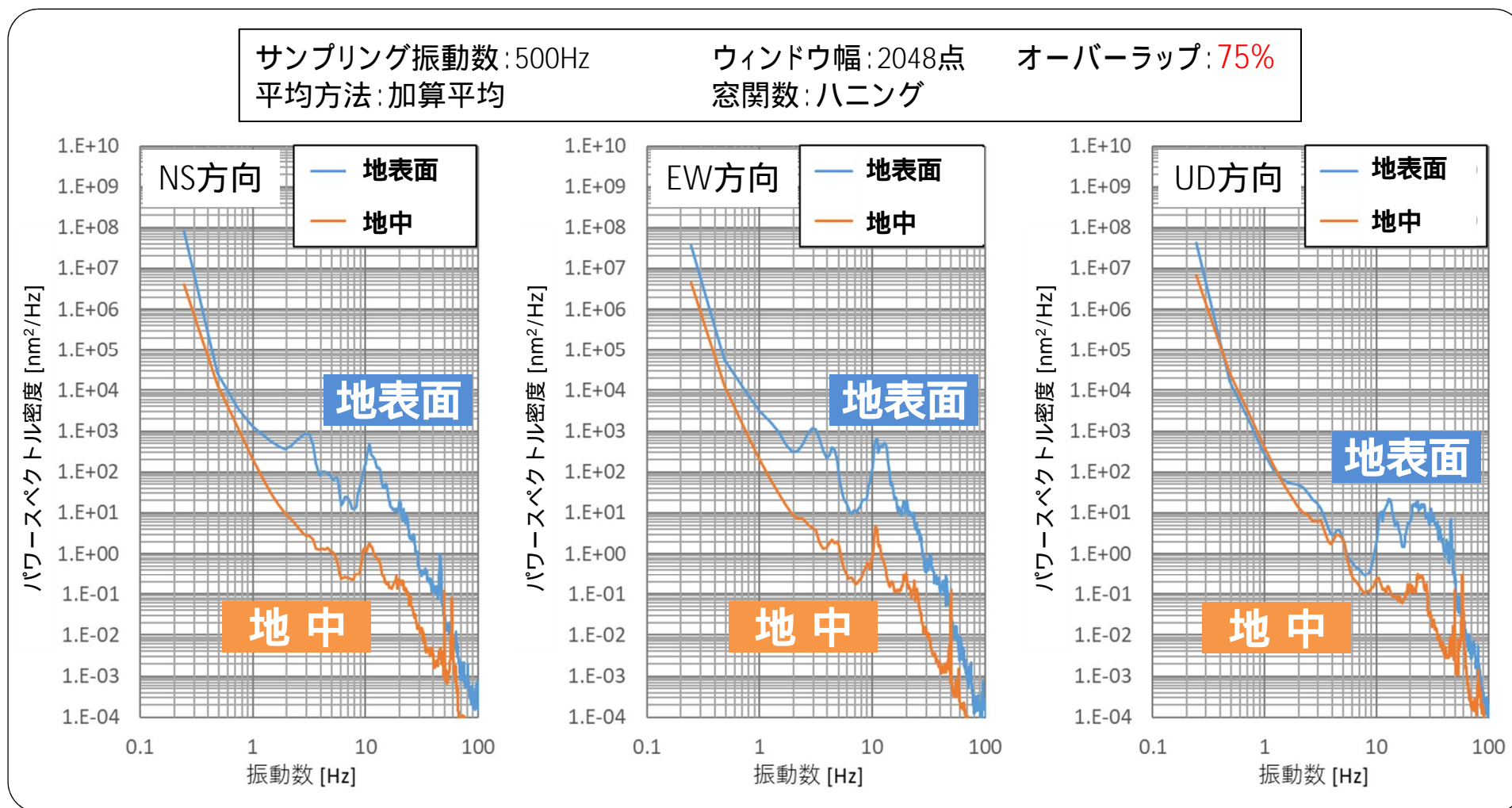
- ・10月22日(月) 午前 1時39分～ 1時49分

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

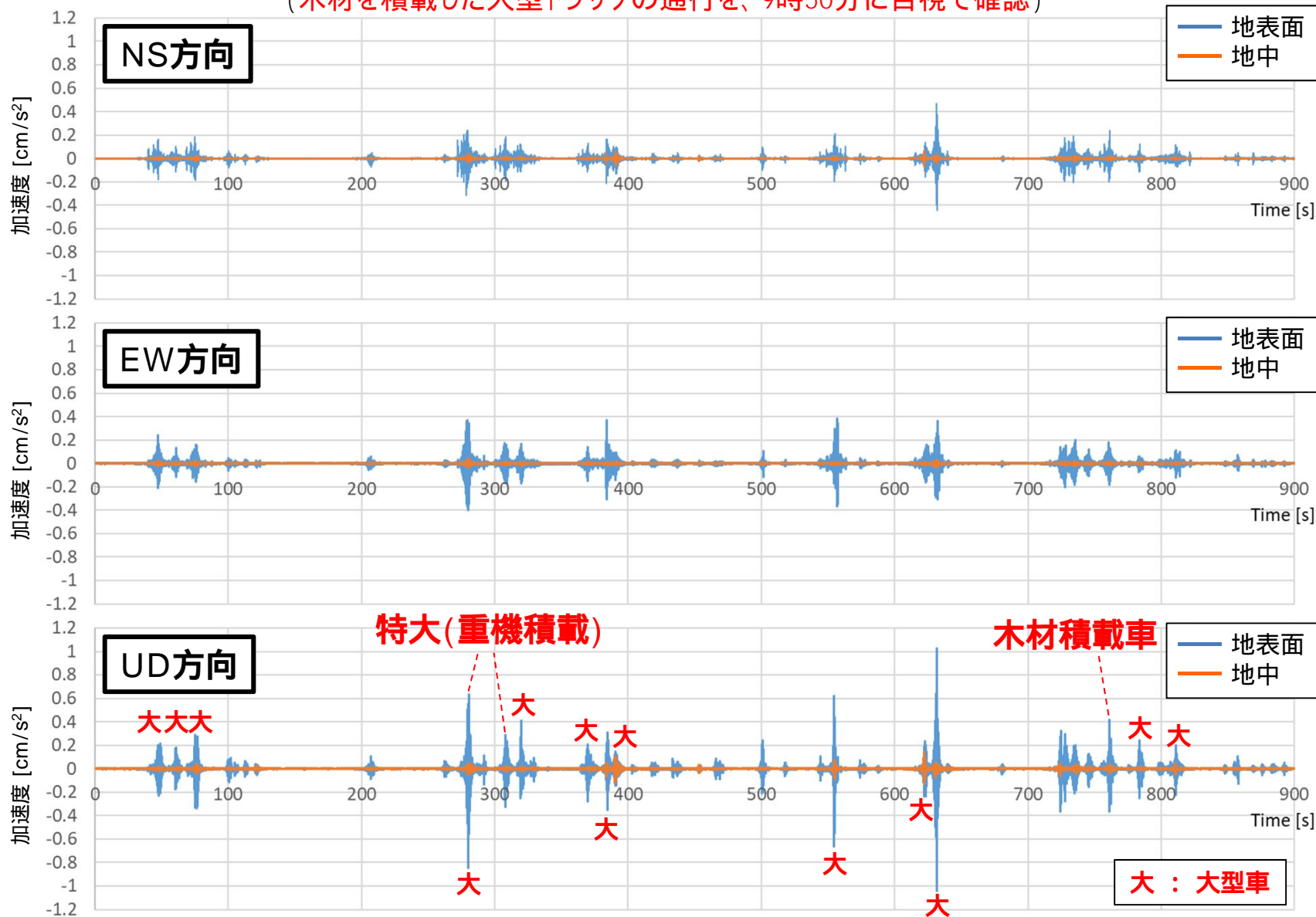


地表面では水平振動が大きい。地中では全方向とも同程度に小さい値となっている。

4.2 加速度波形：交通振動の大きい時間帯

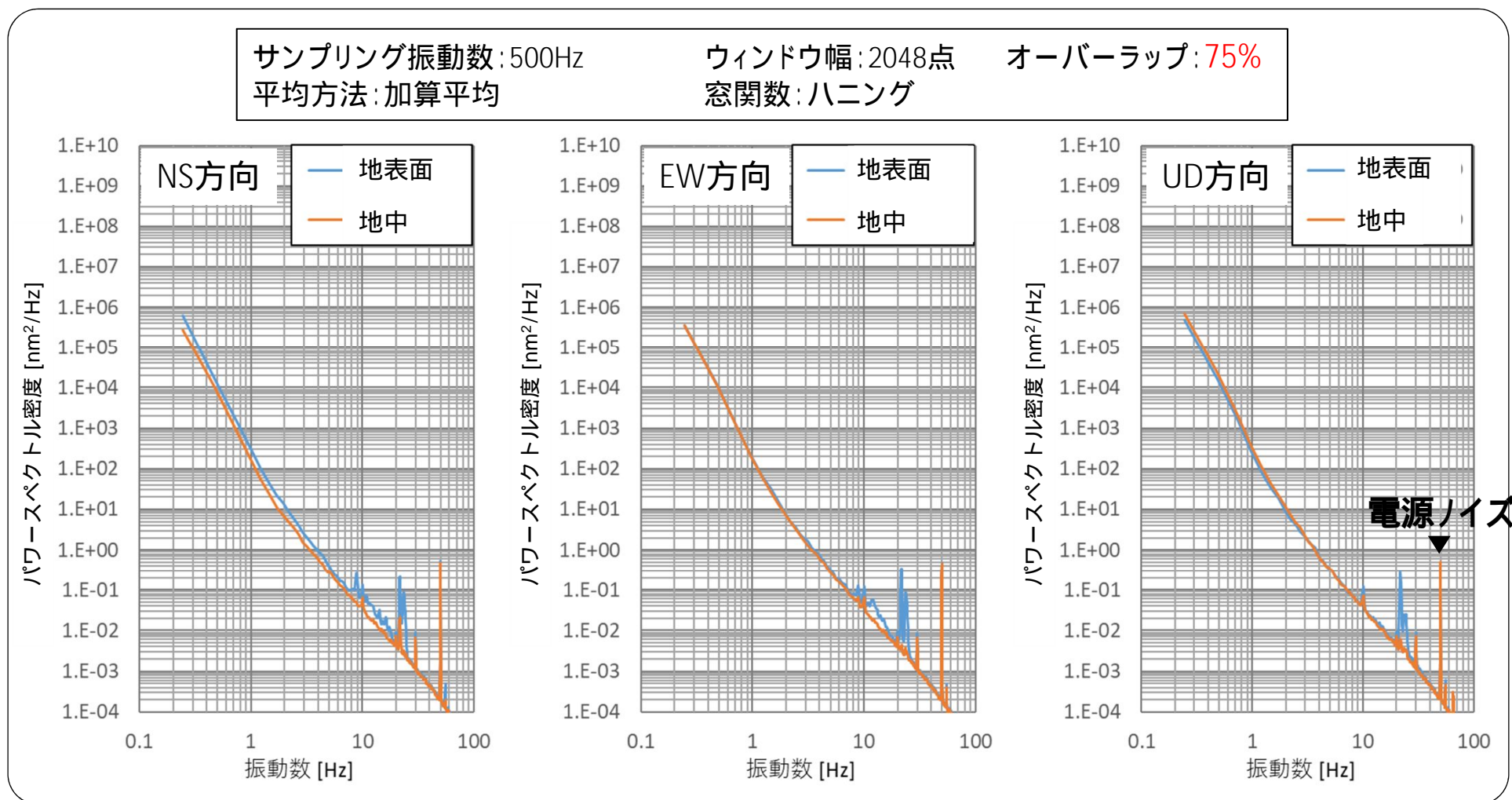
10月22日9時37分～52分の加速度波形を各方向、地表と地中で重ねて示す

(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

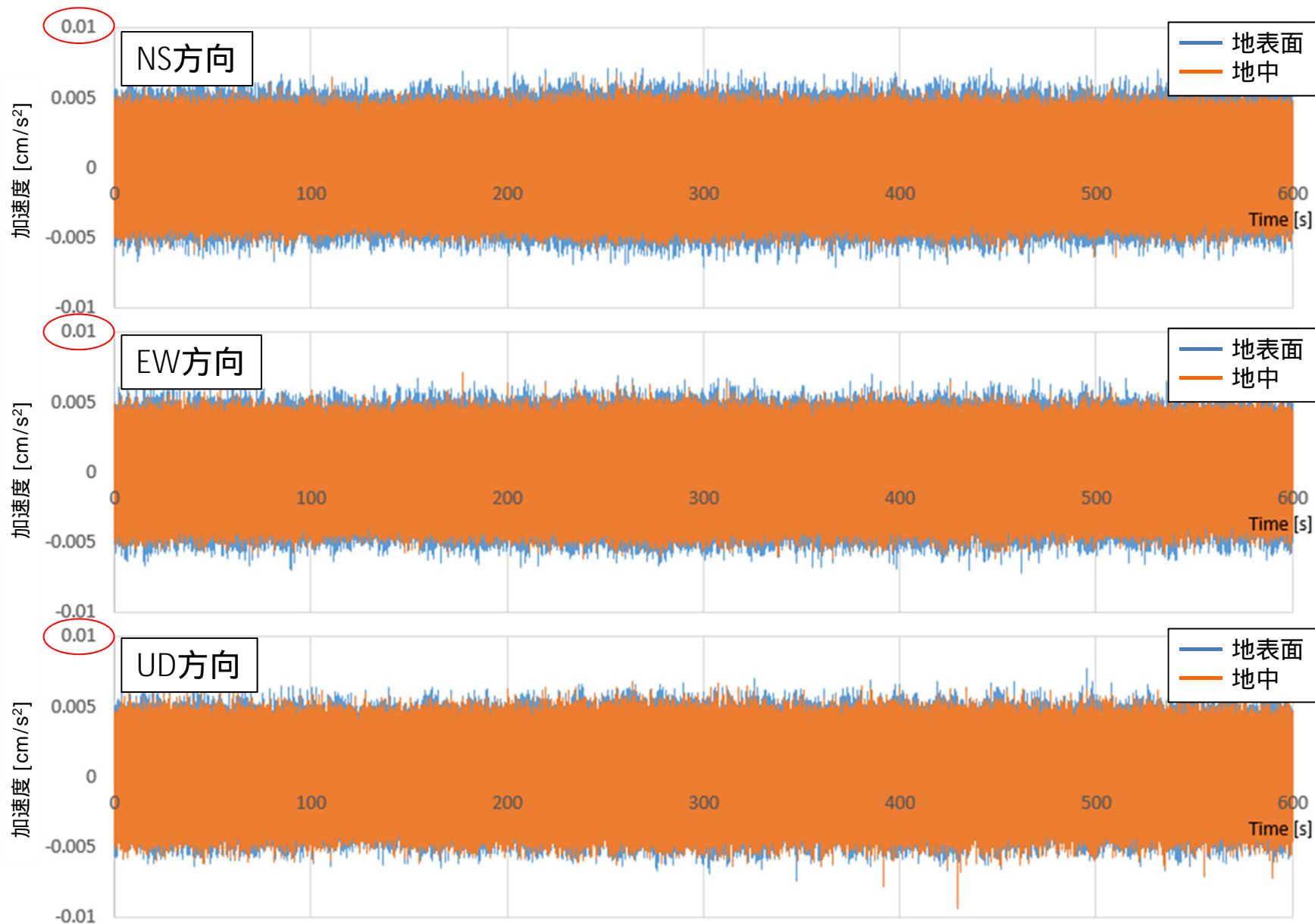
10月22日1時39分～49分のパワースペクトル密度を示す



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

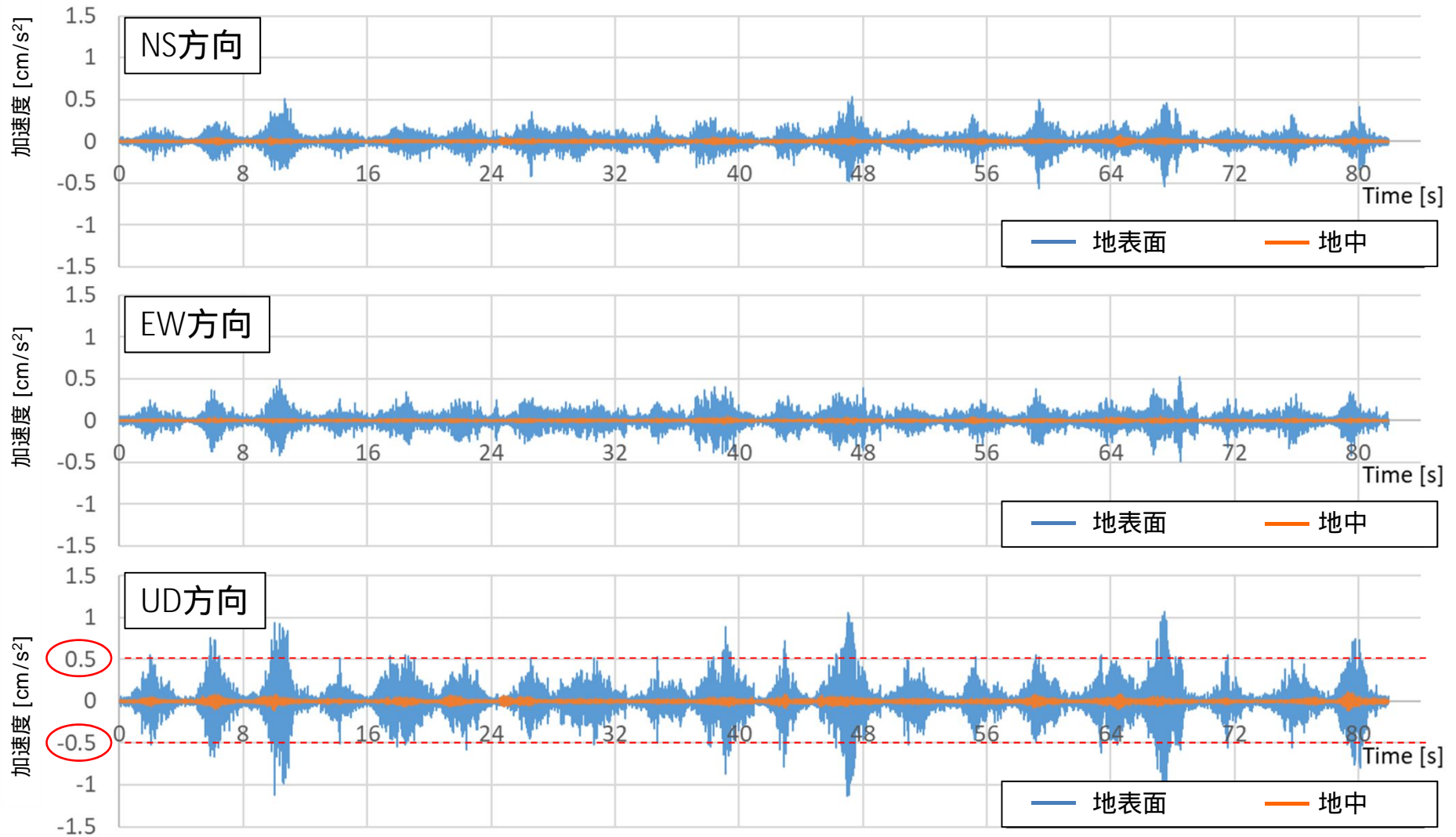
静かな時間帯	NS方向	EW方向	UD方向	
22日 1時39分 ~	7.3nm	7.4nm	9.2nm	< 10nm @1Hz



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

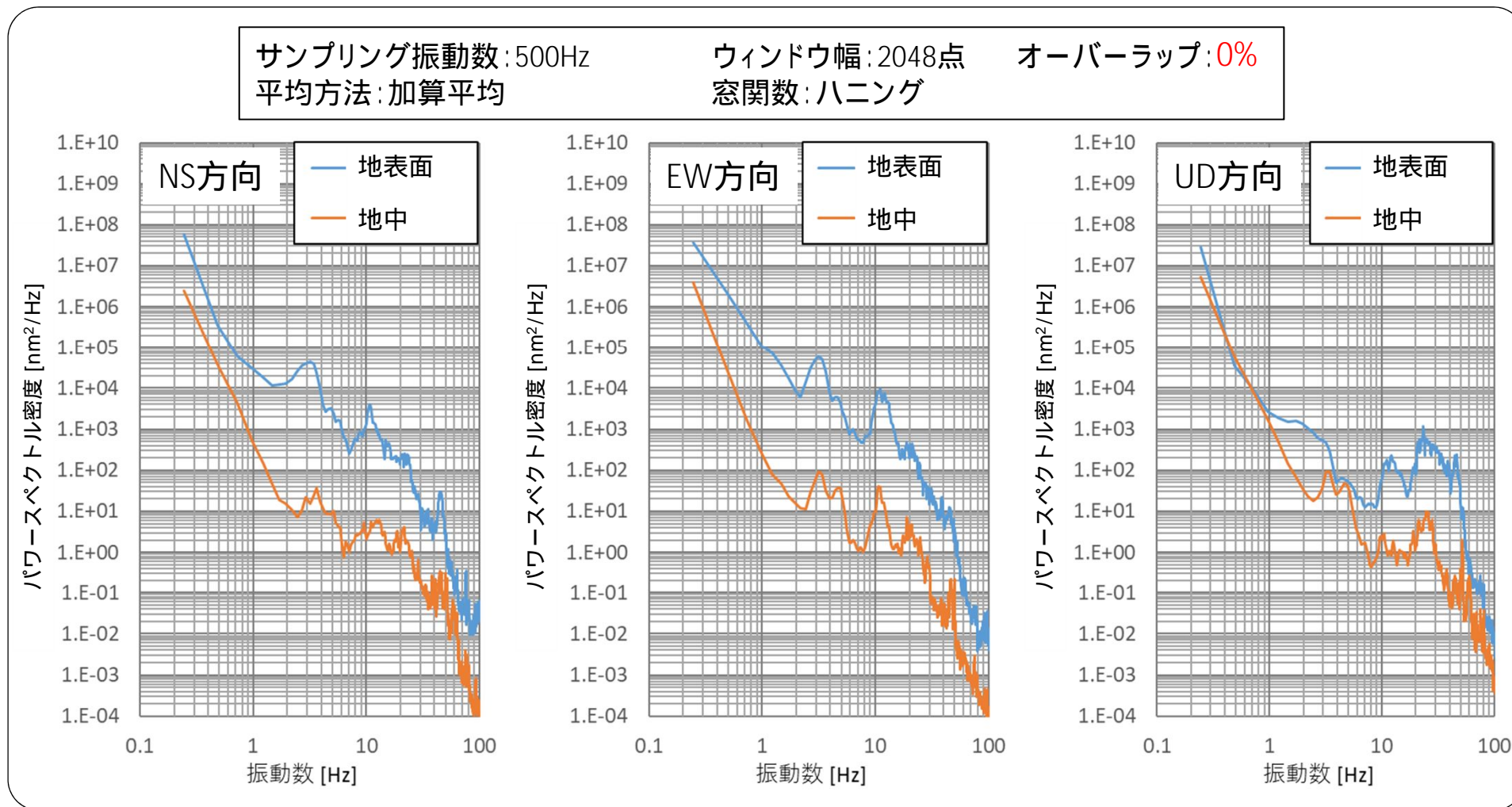
4.5 車両通行時のみの加速度波形分析

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

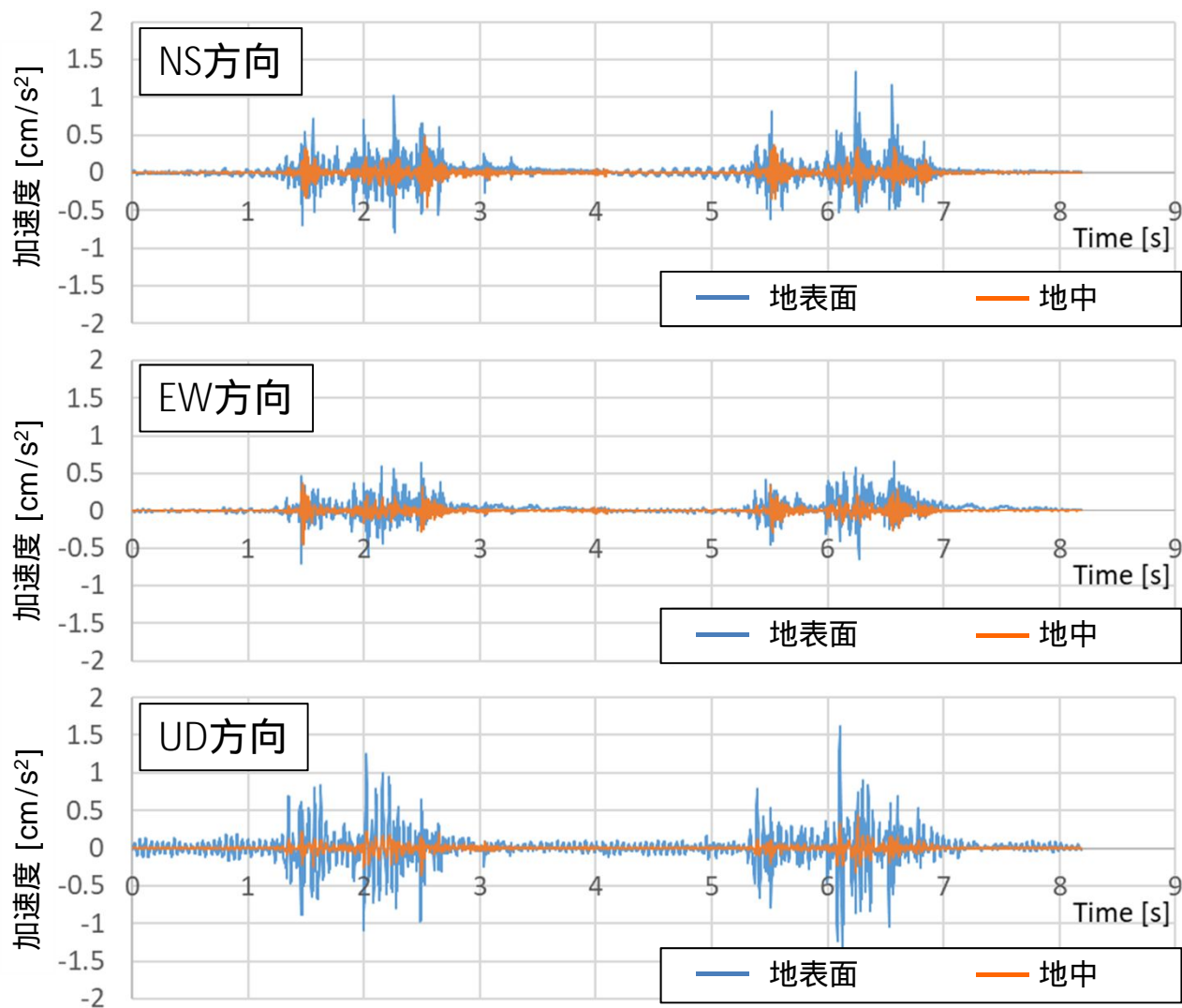
GL - 3.5m掘削時、及びGL - 10m掘削時にトラック衝撃加振を実施

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. Three sensors are positioned at different depths: one at the surface (GL), one at 3.5m depth (GL - 3.5m), and one at 10m depth (GL - 10m). A dashed red arrow shows the vibration wave traveling from the surface sensor down to the 10m sensor. At the bottom of the diagram, a red line indicates a depth of 16m (GL - 16m) with two question marks, and the text '花崗閃緑岩' (Granite/Gneiss) is written below it. To the right of the diagram are two photographs. The top photograph, dated '18日', shows a blue truck on a gravel surface with a sign that reads '18日:トラック加振状況(1回目)'. The bottom photograph, dated '21日', shows the same truck and sign, with the sign now reading '21日:トラック加振状況(2回目)'.

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

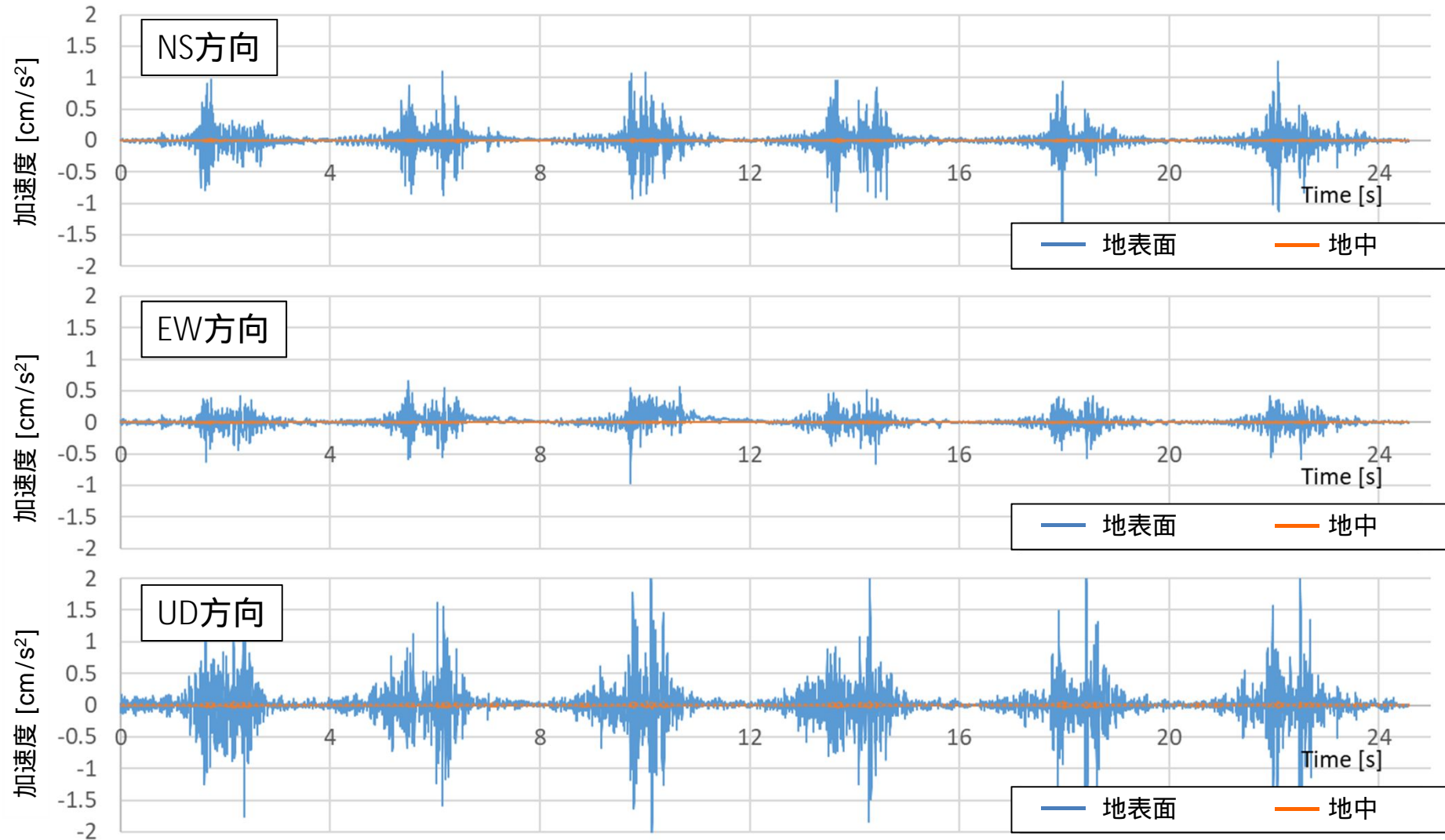


地表面 **地中へ至る過程で、振動は大きく低減している**

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。

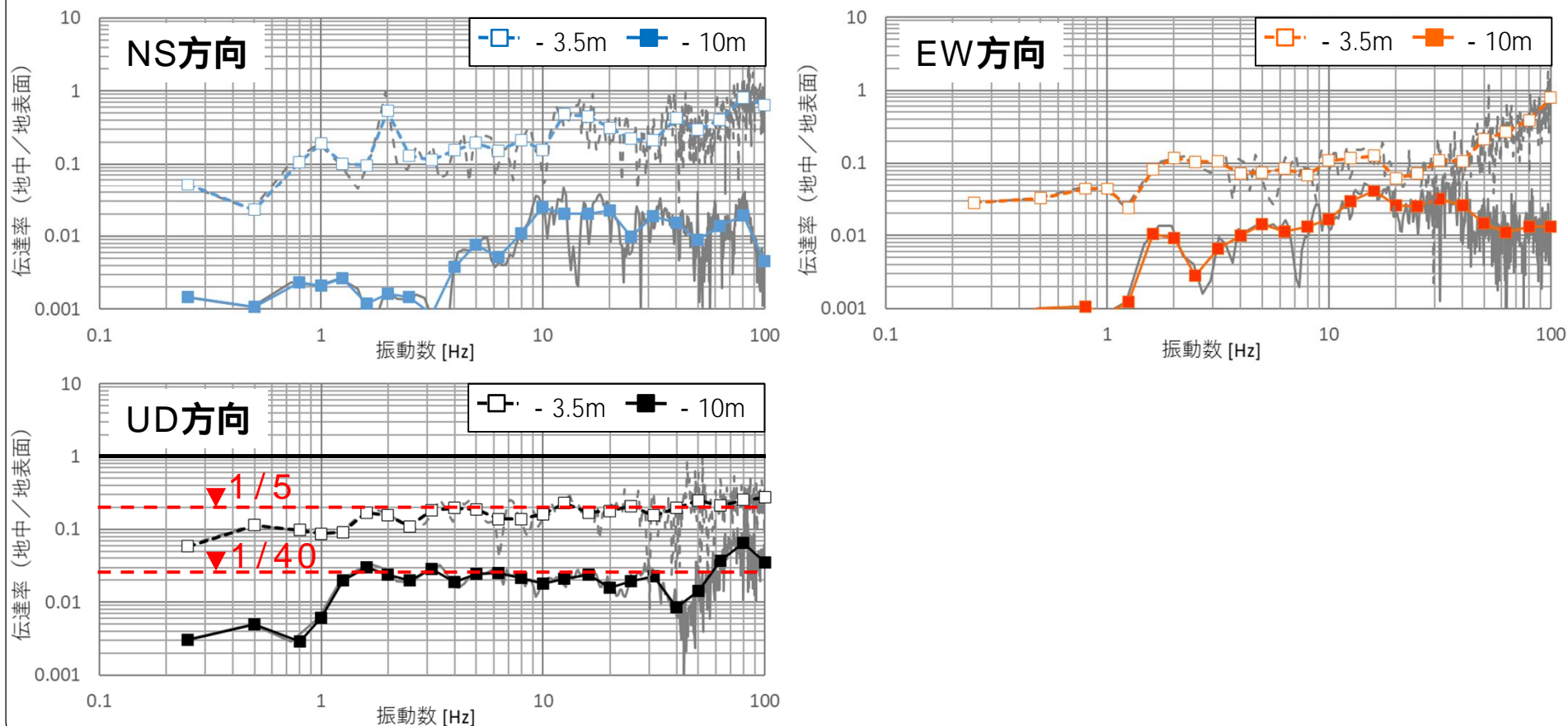


- 3.5 m よりもさらに地中での振動が小さくなっている

5.4 地表面 地中への振動伝達率

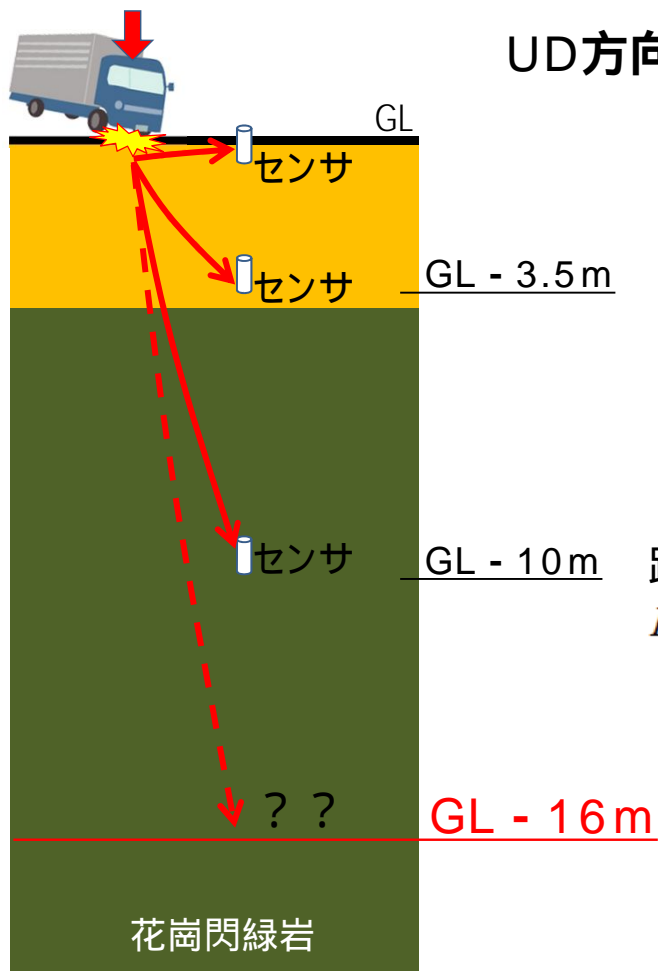
FFTの過程で「GL - 3.5m / 地表面」、及び「GL - 10m / 地表面」の演算を行い伝達率を算出
対数軸上で 1Hz以降等間隔となるよう 1/3オクターブバンド中心周波数ごとに平均処理

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

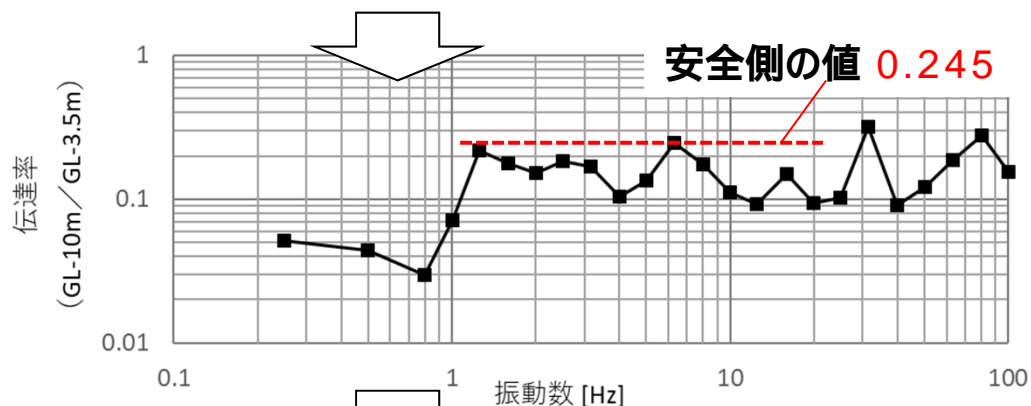


UD方向では - 3.5m地点で約 $1/5$, - 10m地点で約 $1/40$

5.5 ILC施設床レベル(-16m)の振動予測



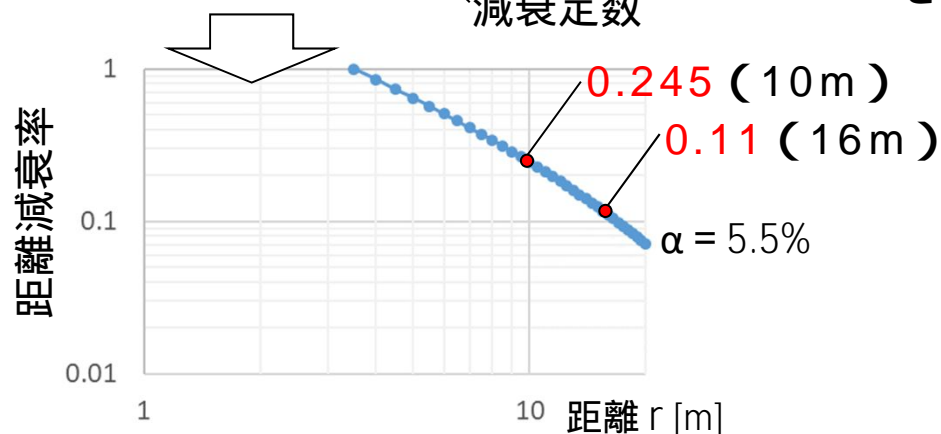
UD方向の伝達率について、「GL - 10m / GL - 3.5m」の値を算出



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 α



- ・減衰定数を安全側($\alpha = 5.5\%$)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

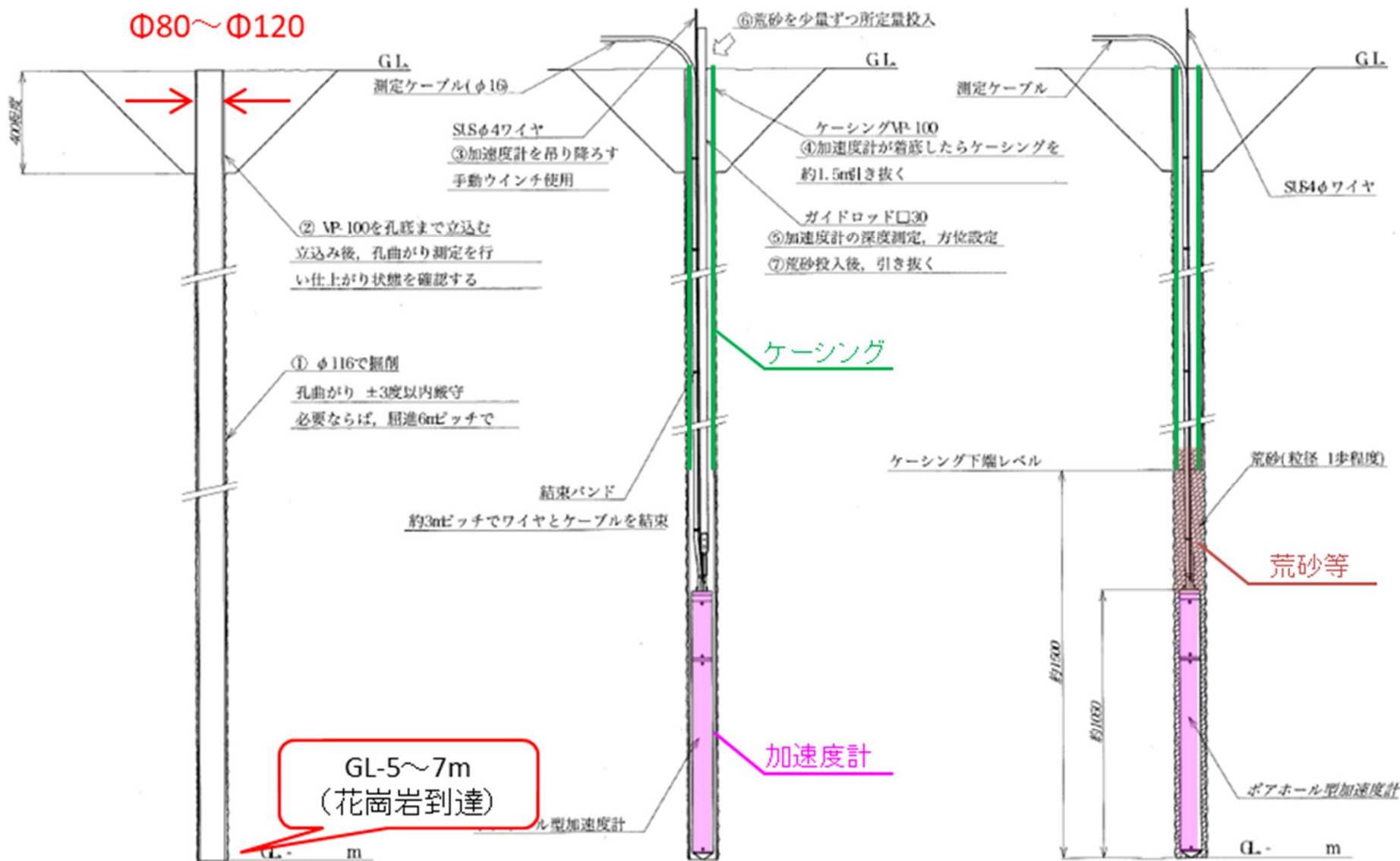
- ・GL - 10m GL - 16m地点に至るまでに振動量は 0.45倍以下になると推測される。



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1. 振動センサの埋設手順



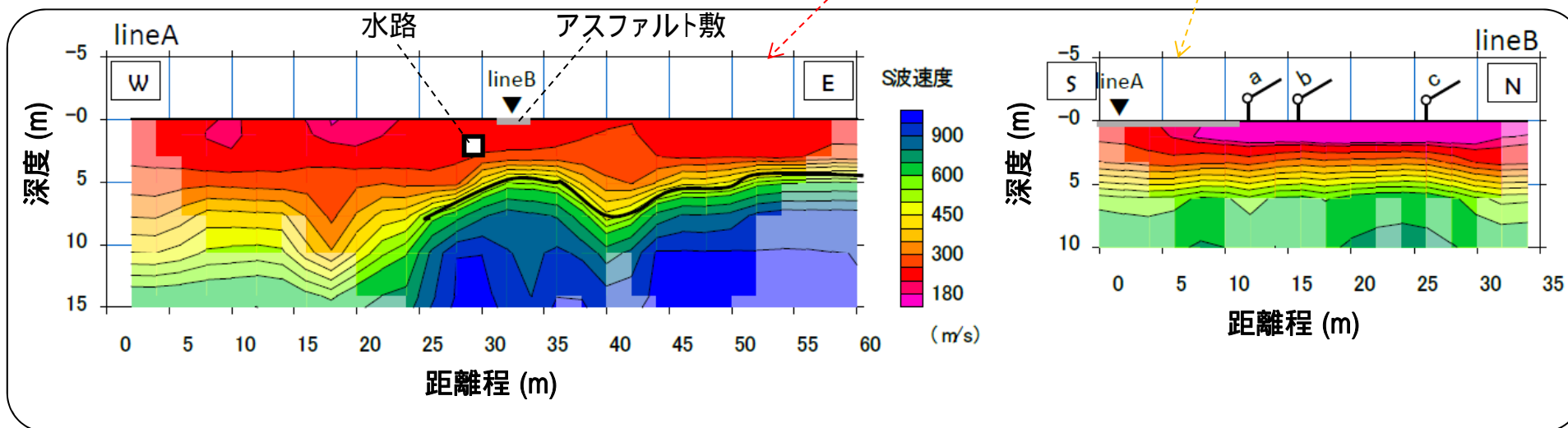
【削孔】

【ケーシング・センサ挿入】

【センサ固定】

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