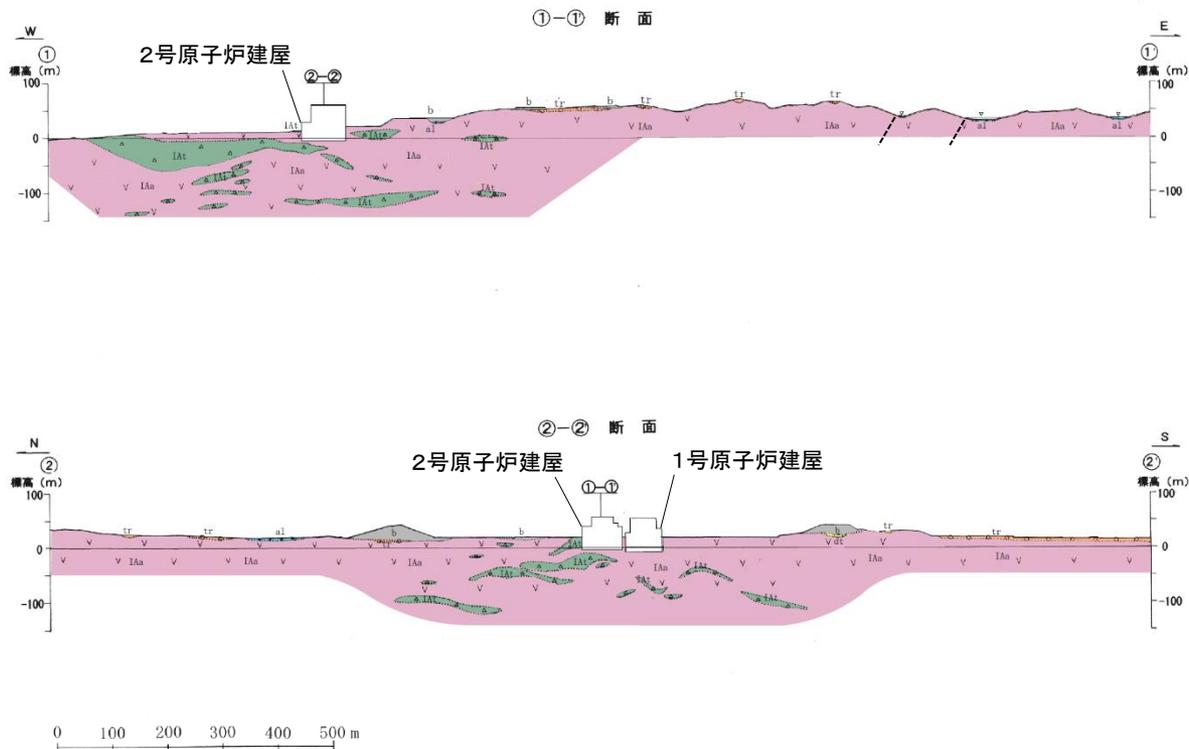


【地質断面図】



凡例

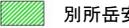
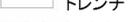
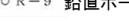
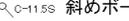
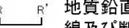
地質時代		地層名	記号	主要構成地質	
新 生 代	第 四 紀	完新世	盛 土	b	礫, 砂, 粘土
		沖 積 層	al	礫, 砂, 粘土	
		崖 堆 積 層	dt	礫, 砂, 粘土	
	更 新 世	段 丘 堆 積 層	tr	礫, 砂, 粘土	
新 第 三 紀	中 新 世	別所岳安山岩類 (岩福階)	IAa	安 山 岩	
			IAAt	凝灰角礫岩類	

---- 断層

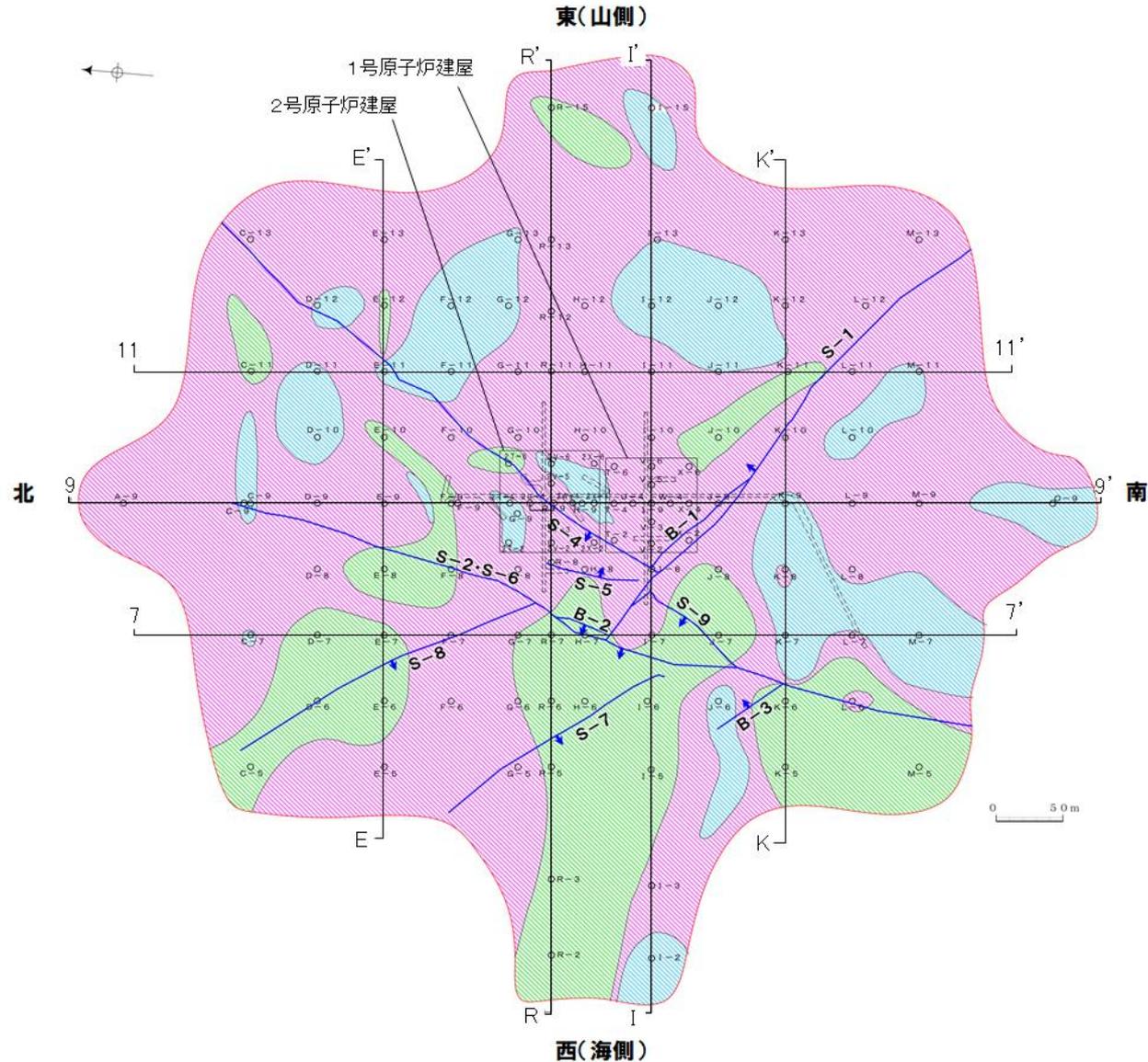
敷地の地質断面図

○ 原子炉設置位置付近の地質は、別所岳安山岩類の安山岩(均質)、安山岩(角礫質)及び凝灰角礫岩からなる。

凡 例

-  別所岳安山岩類 安山岩(均質)
-  別所岳安山岩類 安山岩(角礫質)
-  別所岳安山岩類 凝灰角礫岩
-  地質境界
-  断層及び断層名 (EL-4.7m)
-  試掘坑, 試験坑, 斜坑
-  トレンチ
-  ○ R-9 鉛直ボーリング孔及び孔名
-  ○ C-11SS 斜めボーリング孔及び孔名
-  地質鉛直断面図断面線及び断面記号

矢印(▲)の向きは断層の傾斜方向を示す
(B-1の傾斜はほぼ90°)



地質水平断面図(EL-4.7m)

【敷地の別所岳安山岩類の産状】

○敷地に分布する別所岳安山岩類は、安山岩と凝灰角礫岩からなる。安山岩は岩相により、安山岩(均質)と安山岩(角礫質)に区分される。3岩種の産状は以下のとおり。

岩種	産状
安山岩(均質)	岩相が比較的均質な安山岩質溶岩。暗灰色を呈し、緻密で堅硬である。節理は比較的多く認められる。岩石組織は一様である。
安山岩(角礫質)	角礫状を呈する安山岩質溶岩。暗灰色ないし赤褐色を呈し、安山岩の大小の礫を含む。基質は比較的堅硬である。また、節理も少なく塊状であり、礫と基質の境界は不明瞭な場合が多い。
凝灰角礫岩	節理が少なく塊状で、色調の異なる安山岩質の小礫から中礫を含み、礫と基質の境界は明瞭であり密着している。また、堆積構造が認められる場合がある。



安山岩(均質)



安山岩(角礫質)



凝灰角礫岩

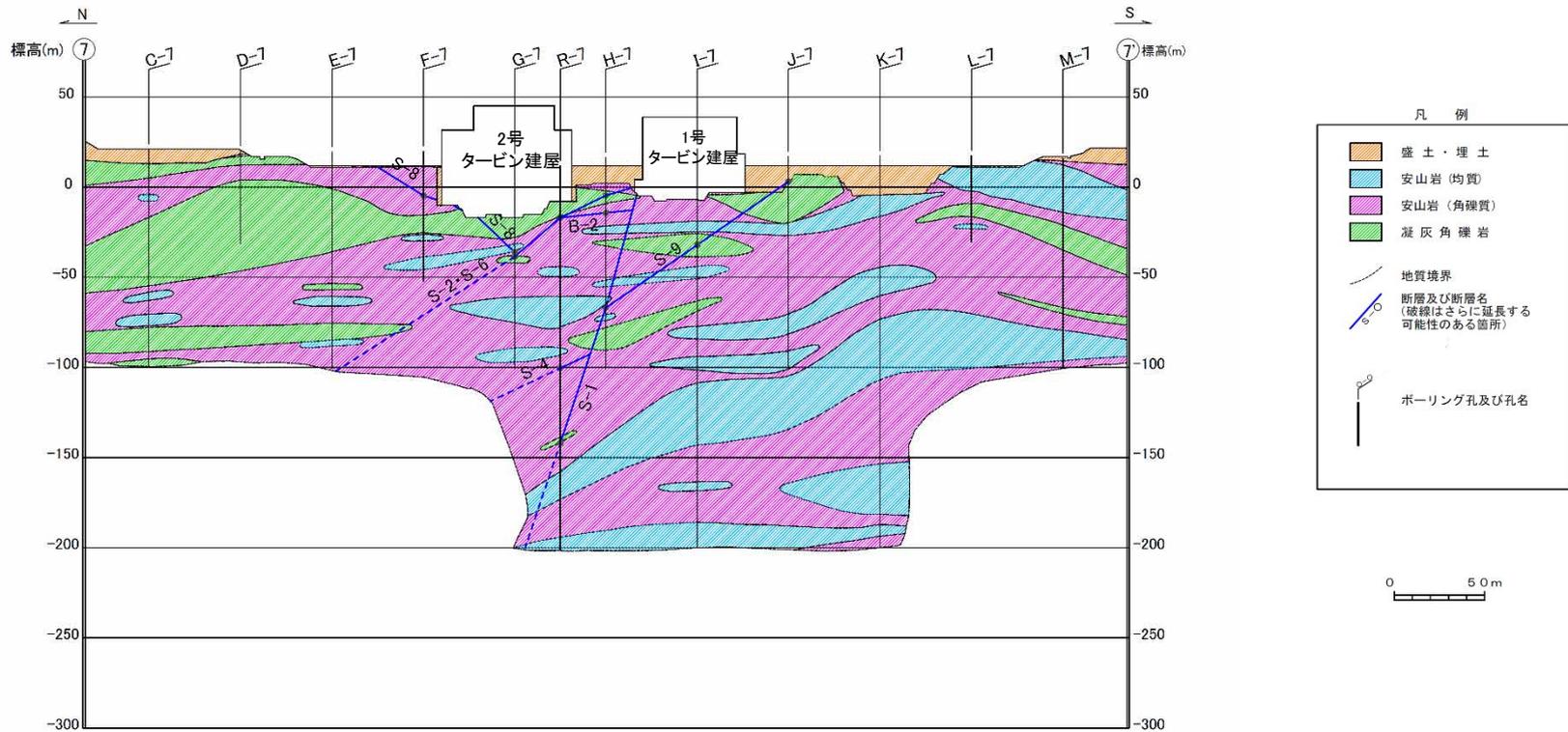
岩石試験一覧表※

物 理 試 験	岩 種	安山岩(均質)		安山岩(角礫質)	凝灰角礫岩		
		A a	B a	B b	B b		
物 理 試 験	試験個数	21	123	317	151		
	密度 (g/cm ³)	平均値	2.71	2.68	2.27	2.28	
		標準偏差	0.06	0.05	0.09	0.08	
	吸水率 (%)	平均値	1.12	1.34	12.58	12.14	
		標準偏差	0.58	0.56	2.45	2.92	
	有効間隙率 (%)	平均値	2.98	3.53	25.28	24.62	
		標準偏差	1.41	1.37	3.61	4.40	
	超 音 波 試 験	試験個数	21	123	317	151	
		P波速度 (km/s)	平均値	5.65	5.53	3.79	3.77
			標準偏差	0.23	0.25	0.41	0.42
S波速度 (km/s)		平均値	3.06	2.98	1.90	1.89	
		標準偏差	0.10	0.18	0.23	0.22	
動弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)		平均値	65.1	61.9	21.8	21.8	
		(66.4)	(63.1)	(22.2)	(22.2)		
(×10 ⁴ kg/cm ²)		平均値	4.9	7.5	5.7	5.5	
		標準偏差	(5.0)	(7.6)	(5.8)	(5.6)	
動ポアソン比		平均値	0.29	0.29	0.33	0.33	
	標準偏差	0.02	0.02	0.02	0.02		
力 学 試 験	試験個数	21	123	317	151		
	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	平均値	156.2	147.9	14.9	16.4	
		(1,593)	(1,508)	(152)	(167)		
	(kg/cm ²)	標準偏差	34.9	33.8	6.1	6.4	
	(356)	(345)	(62)	(65)			
	静弾性係数 (×10 ³ N/mm ²)	平均値	59.6	57.3	12.0	12.3	
		(60.8)	(58.4)	(12.2)	(12.5)		
	(×10 ⁴ kg/cm ²)	標準偏差	7.4	8.5	5.5	4.8	
		(7.5)	(8.7)	(5.6)	(4.9)		
	静ポアソン比	平均値	0.25	0.25	0.25	0.24	
標準偏差		0.02	0.03	0.06	0.07		
引 張 試 験	試験個数	4	33	65	42		
	引張強度 (N/mm ²)	平均値	10.8	9.8	1.5	1.7	
		(110)	(100)	(15)	(17)		
(kg/cm ²)	標準偏差	-	2.6	0.6	0.6		
(26)	(6)	(6)	(6)				

※敷地全域のボーリングコア等による3岩種の平均物性値[志賀原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書(2号原子炉の増設)参照]

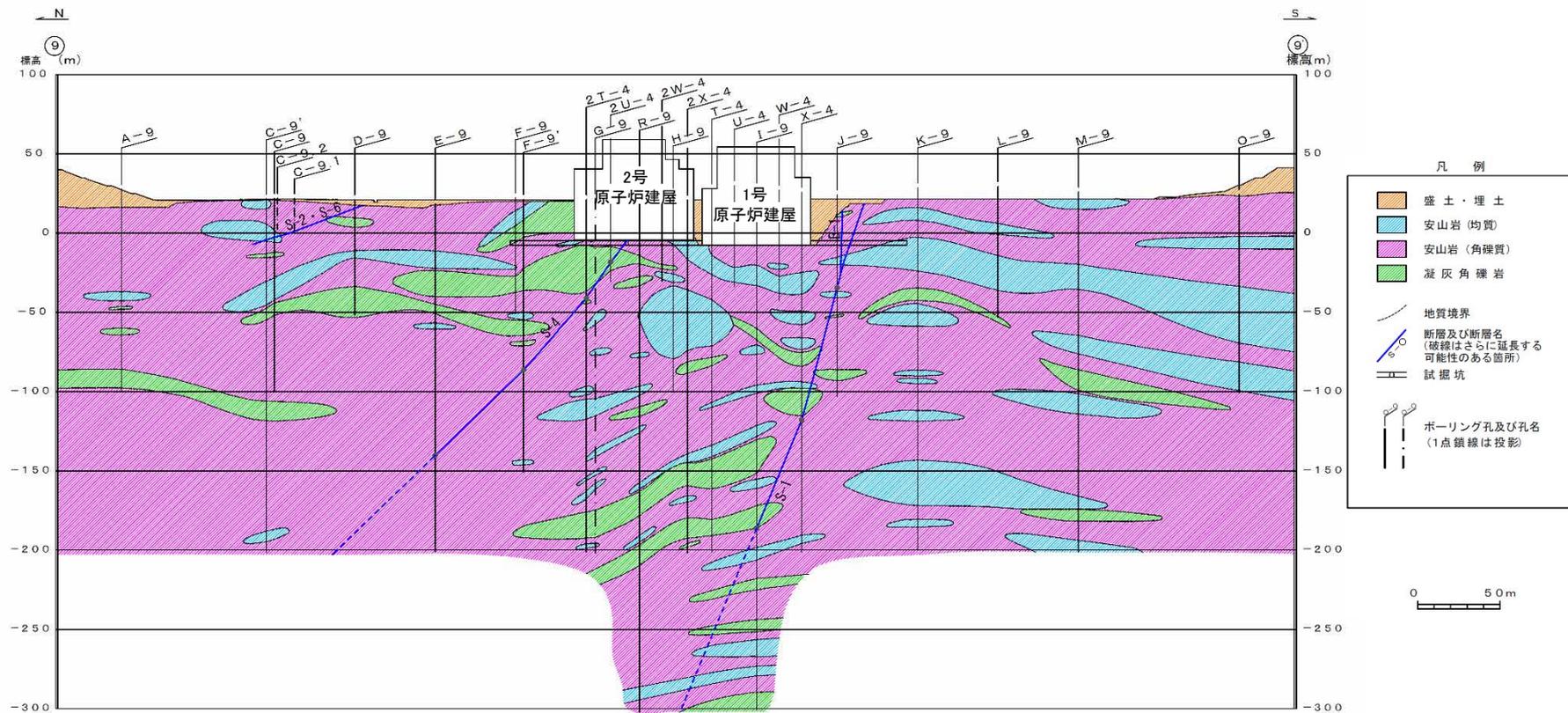
・別所岳安山岩類の3岩種のうち、安山岩(均質)は他の2岩種に比べて硬質である(岩石試験一覧表)

【7-7' 断面】



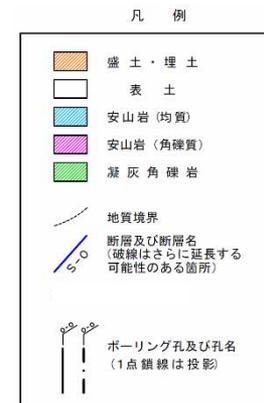
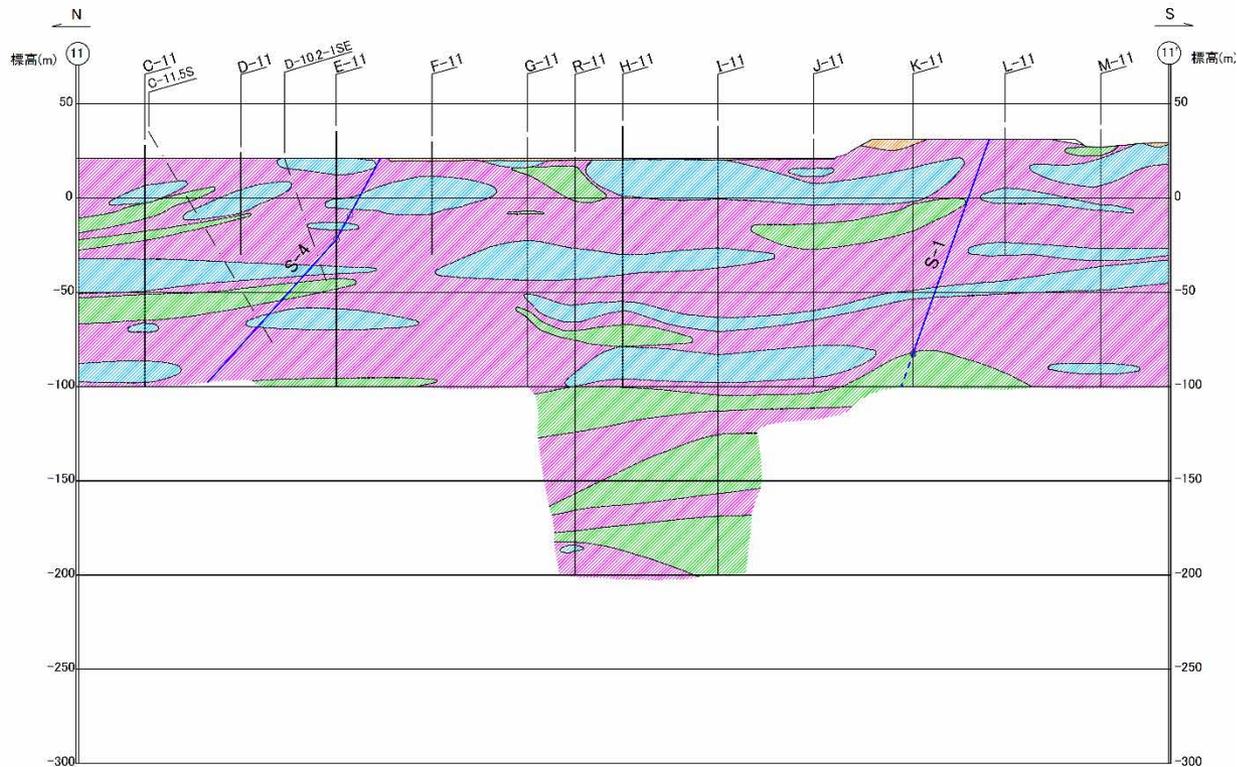
地質鉛直断面図(7-7'断面)

【9-9' 断面】



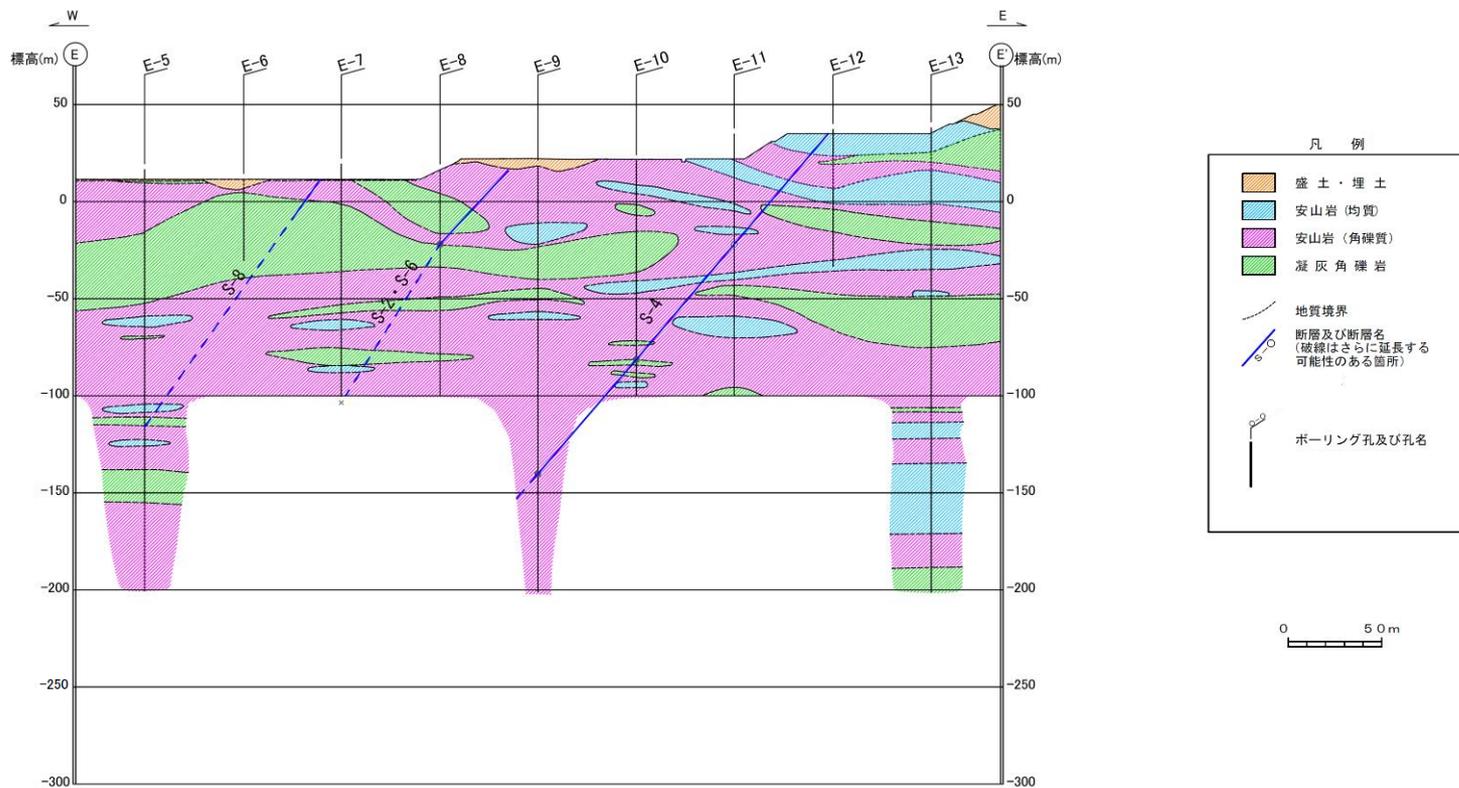
地質鉛直断面図(9-9' 断面)

【11-11'断面】



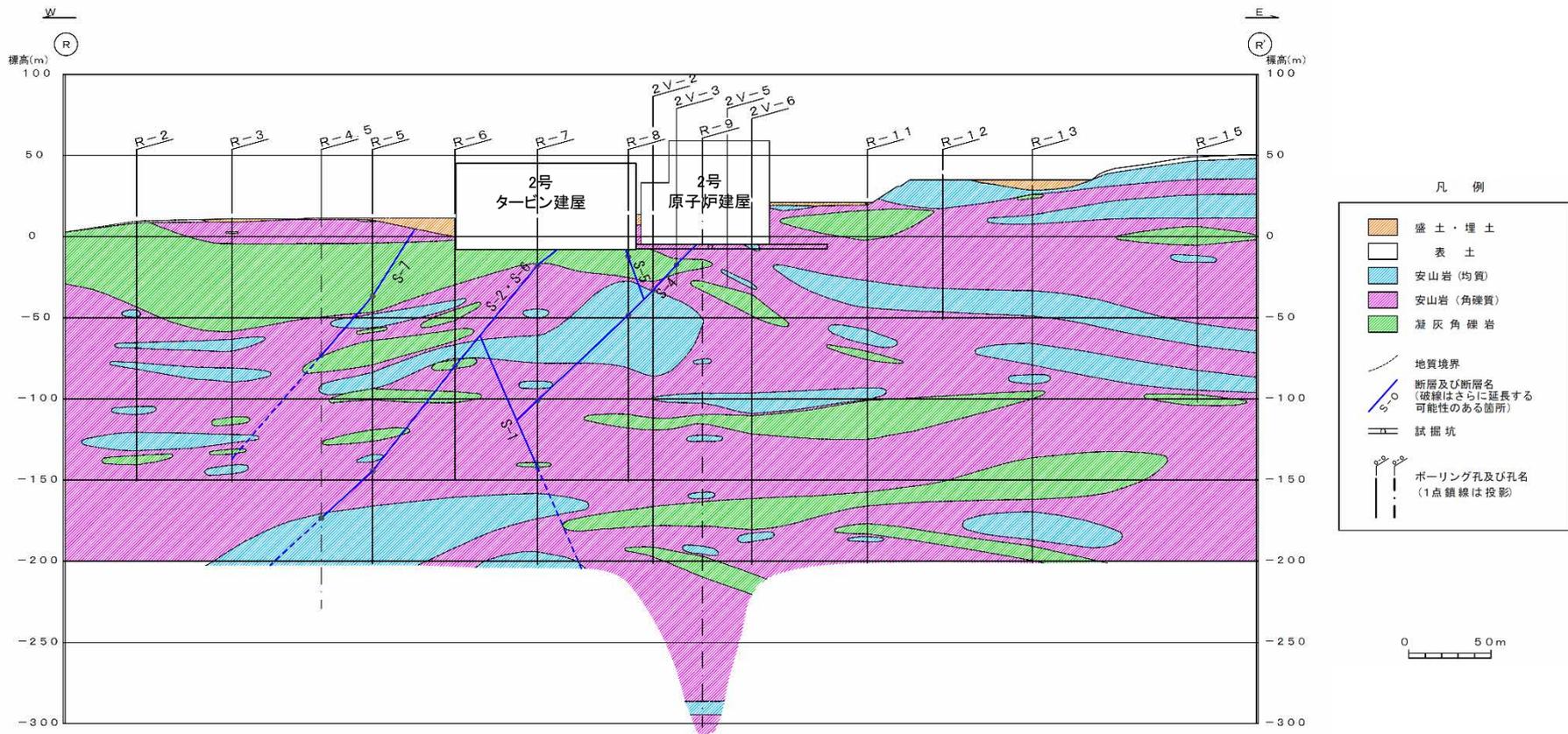
地質鉛直断面図(11-11'断面)

【E-E' 断面】



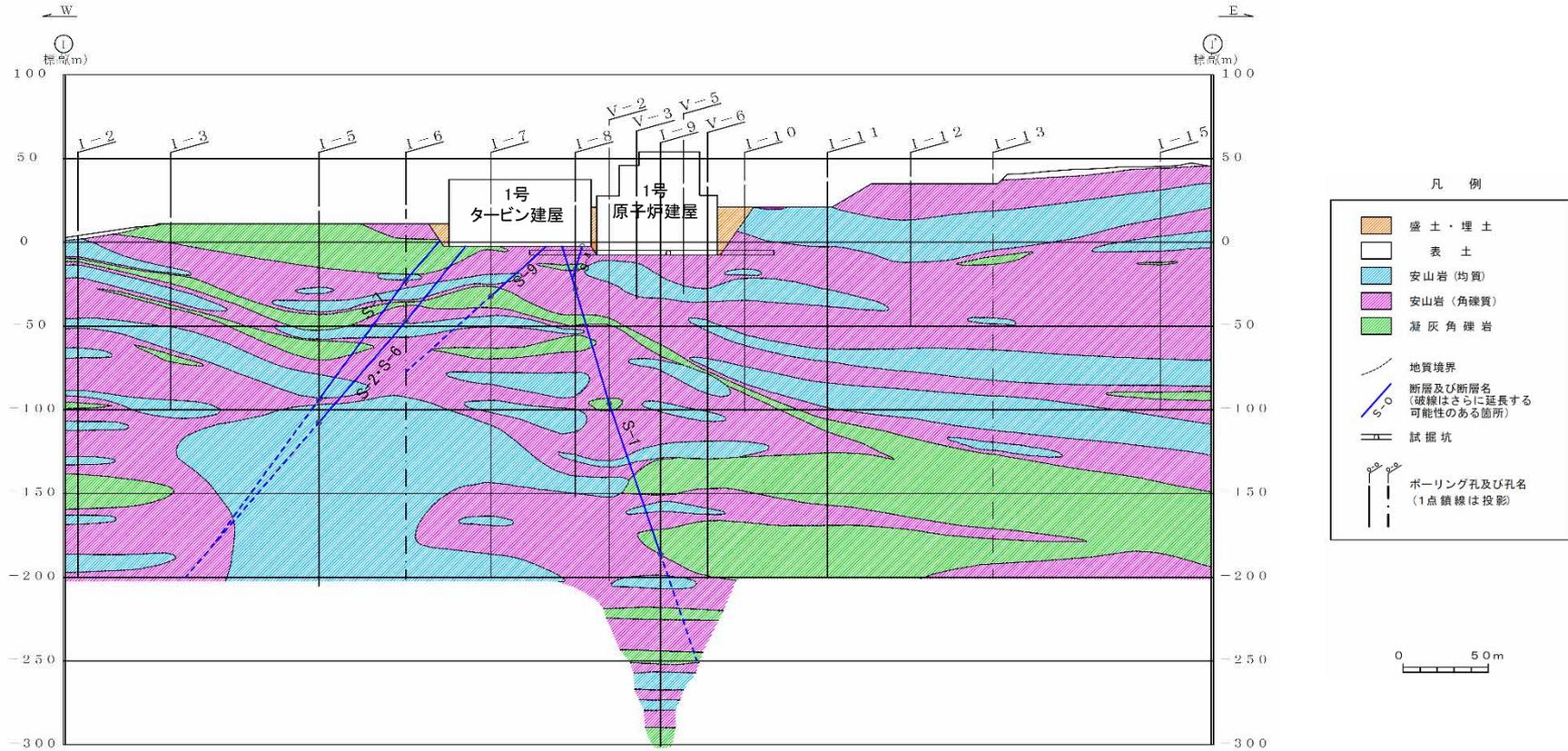
地質鉛直断面図(E-E' 断面)

【R-R'断面】



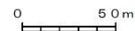
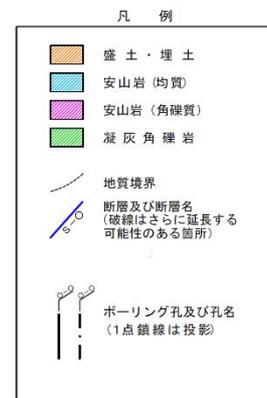
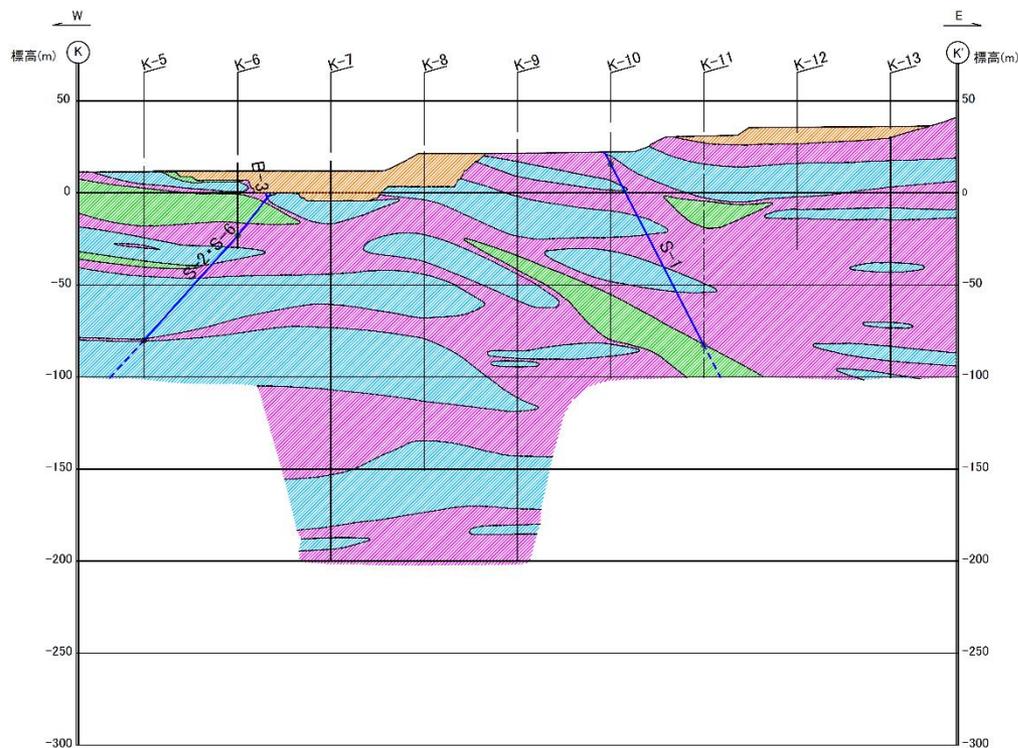
地質鉛直断面図(R-R'断面)

【I-I' 断面】



地質鉛直断面図(I-I' 断面)

【K-K' 断面】



地質鉛直断面図(K-K' 断面)

1.1.3 敷地の地質・地質構造
原子炉設置位置

○ 2号原子炉建屋底盤の岩盤にはほとんど変質部は認められず、主に(Ba)級、(Bb)級の岩級区分を示す安山岩が広く分布している。

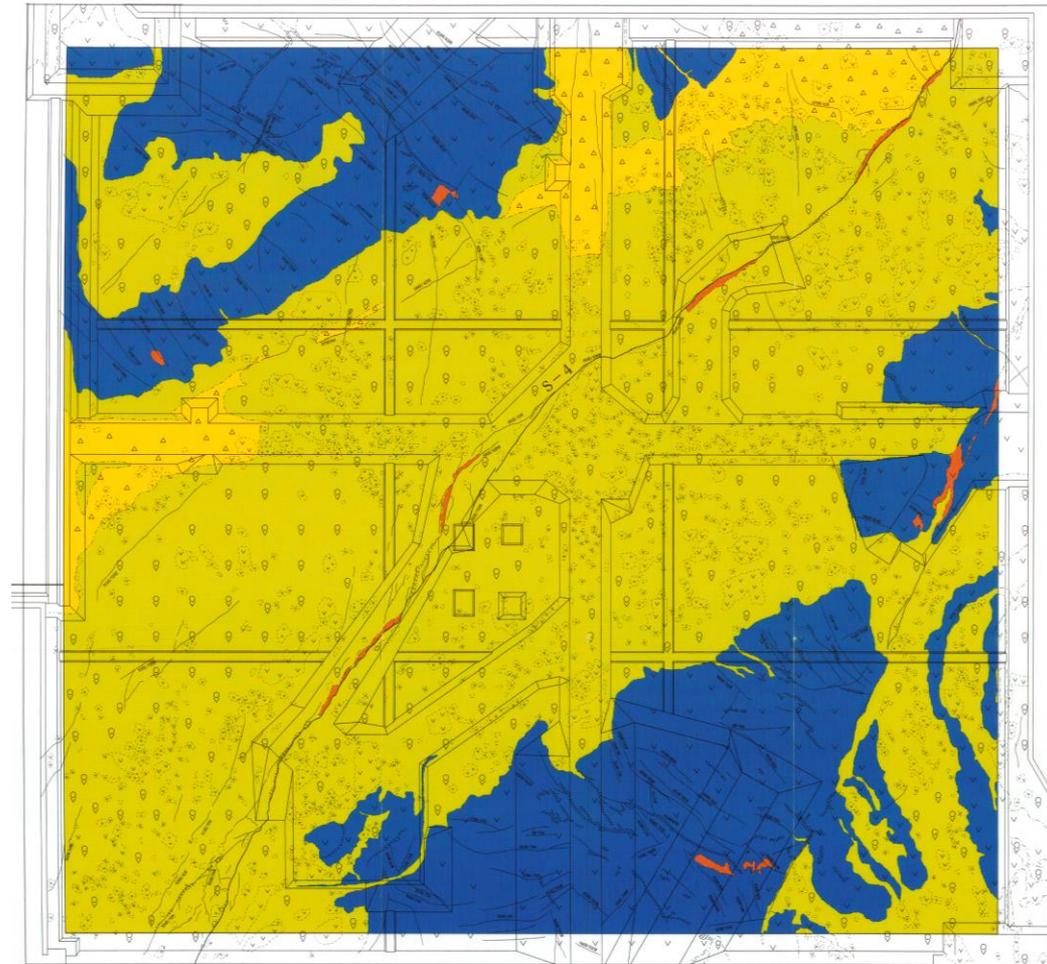
岩級区分基準

安山岩(均質)

安山岩(角礫質), 凝灰角礫岩

岩級	特徴	岩級	特徴
(Ba)	<ul style="list-style-type: none"> ・ハンマの軽打で高音を発する。 ・節理間隔5cm～50cm程度である。 ・ハンマの打撃で鋭利な割れ口ができるか割れ目から砕ける。 	(Bb)	<ul style="list-style-type: none"> ・ハンマの軽打で中高音を発する。 ・節理はほとんどなく、ヘアクラック程度のひび割れがあり、間隔5cm程度以上である。 ・ハンマの打撃で鈍い割れ口ができる。
(Ca)	<ul style="list-style-type: none"> ・ハンマの軽打で低音を発する。 ・節理間隔5cm程度以下である。 ・ハンマの打撃で容易に砕ける。 	(Cb)	<ul style="list-style-type: none"> ・ハンマの軽打で低音を発する。 ・節理あるいはヘアクラック程度のひび割れがあり、間隔5cm程度以下である。 ・ハンマの打撃で容易に砕ける。

凡例

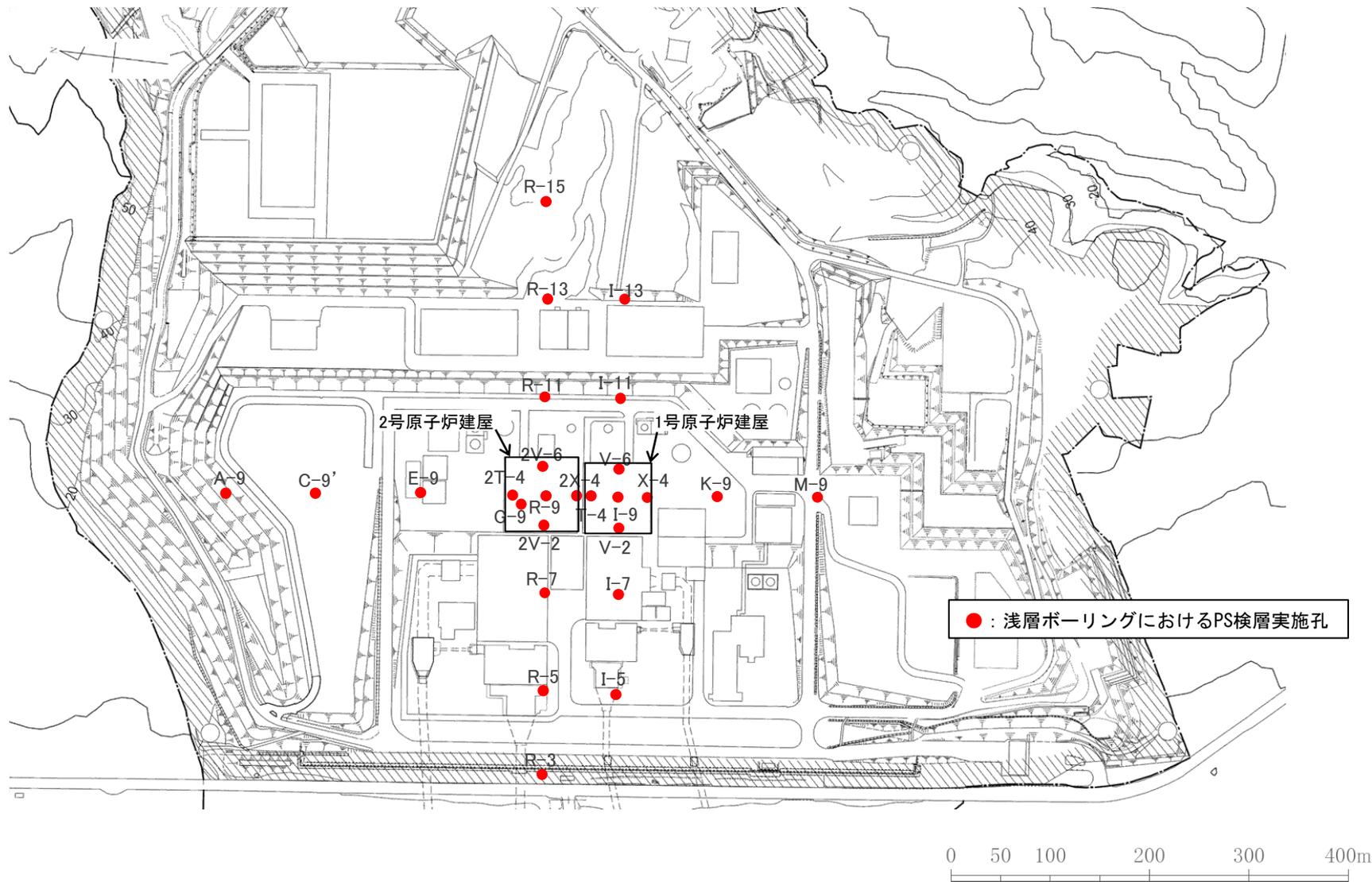


0 5 10m

2号原子炉建屋底盤 岩級区分図

調査位置図

○ 原子炉設置位置付近のEL-200m以浅の速度構造を把握するため、下図に示す26孔の浅層ボーリングで実施したPS検層結果(ダウンホール法)を確認した。

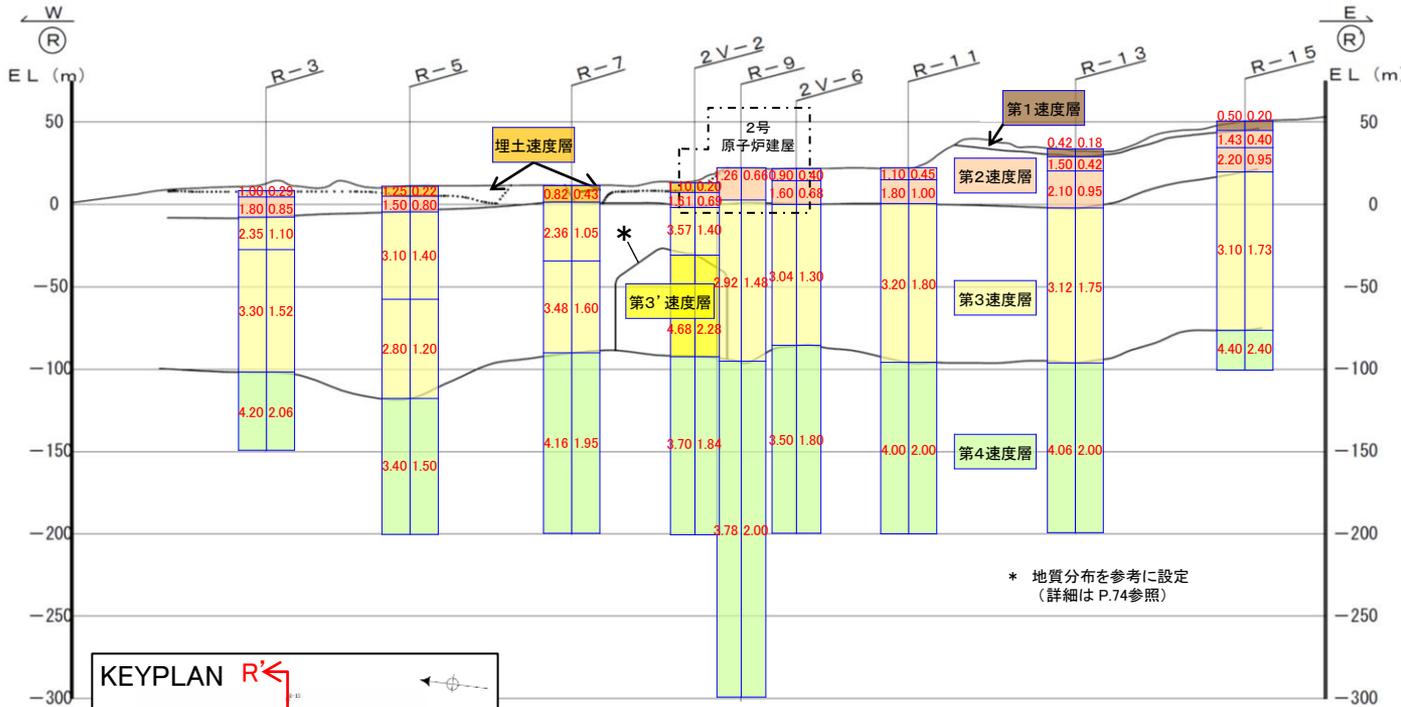


調査位置図

1.1.4 原子炉設置位置付近の速度構造等(EL-200m以浅)

調査結果(R-R'断面)

- 原子炉設置位置付近の東西方向(R-R'断面)の速度層区分は、PS検層実施孔で得られた弾性波速度(V_p , V_s)を踏まえ、埋土速度層及び第1速度層から第4速度層に区分し、第3速度層中において周囲と異なる速度特性(周囲に比べて速度が大きい)を示す範囲を第3'速度層とした。なお、第3'速度層は、第3速度層中に局部的に厚く分布する安山岩(均質)と対応関係が認められる(P.74)。
- 速度層境界は、各孔で得られた速度層境界標高をなめらかに結んだ。
- 浅層ボーリングPS検層結果によれば、原子炉設置位置付近の東西方向(R-R'断面)の速度構造は、概ね水平な層構造を呈す。



凡例

- PS検層実施
ボーリング孔及び孔名
- 盛土及び埋土と岩盤の境界線
- 速度層境界(PS検層)

埋土速度層
第1速度層
第2速度層
第3速度層
第3'速度層
第4速度層

V_p V_s

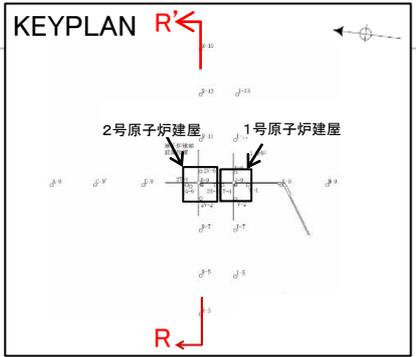
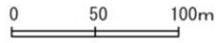
(単位: km/s)

各速度層の弾性波速度及び密度*

速度層区分	P波速度 V_p (km/s)	S波速度 V_s (km/s)	密度 ρ (t/m ³)
埋土速度層	0.79	0.25	2.20
第1速度層	0.42	0.18	1.68
第2速度層	1.37	0.60	1.97
第3速度層	3.19	1.50	2.37
第3'速度層	4.00	2.01	2.55
第4速度層	3.96	1.96	2.38

* 算出方法は、P.77参照。

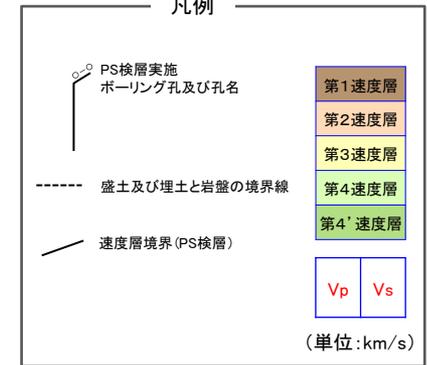
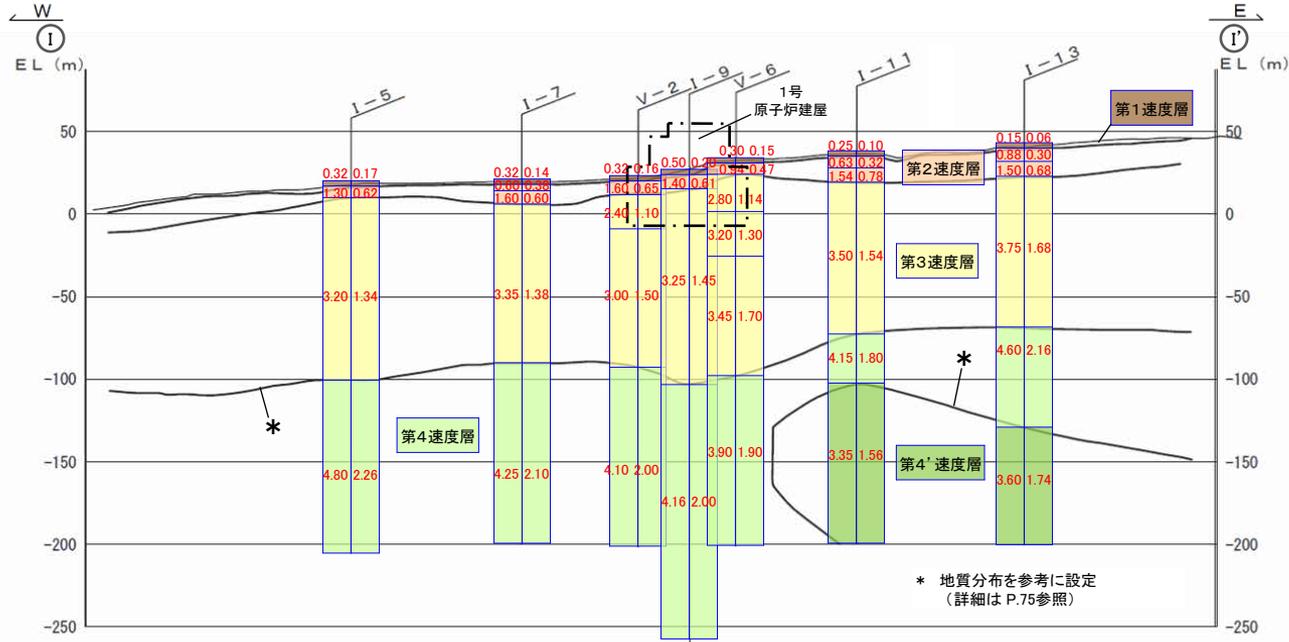
PS検層の走時曲線はデータ集P.7~17。



PS検層結果に基づく速度層断面図(R-R'断面)

調査結果(I-I'断面)

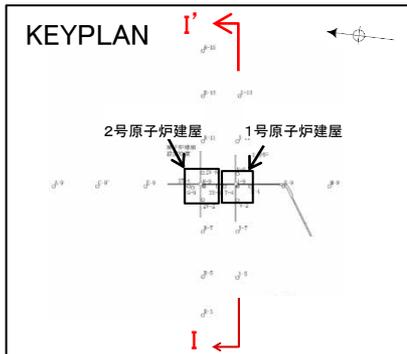
- 原子炉設置位置付近の東西方向(I-I'断面)の速度層区分は、PS検層実施孔で得られた弾性波速度(V_p , V_s)を踏まえ、第1速度層から第4速度層に区分し、第4速度層中において周囲と異なる速度特性(周囲に比べて速度が小さい)を示す範囲を第4'速度層とした。なお、第4'速度層は、第4速度層中に局所的に厚く分布する凝灰角礫岩と対応関係が認められる(P.75)。
- 速度層境界は、各孔で得られた速度層境界標高をなめらかに結んだ。
- 浅層ボーリングPS検層結果によれば、原子炉設置位置付近の東西方向(I-I'断面)の速度構造は、概ね水平な層構造を呈す。



各速度層の弾性波速度及び密度*

速度層区分	P波速度 V_p (km/s)	S波速度 V_s (km/s)	密度 ρ (t/m ³)
第1速度層	0.42	0.18	1.68
第2速度層	1.37	0.60	1.97
第3速度層	3.19	1.50	2.37
第4速度層	3.96	1.96	2.38
第4'速度層	3.45	1.63	2.29

* 算出方法は、P.77参照。

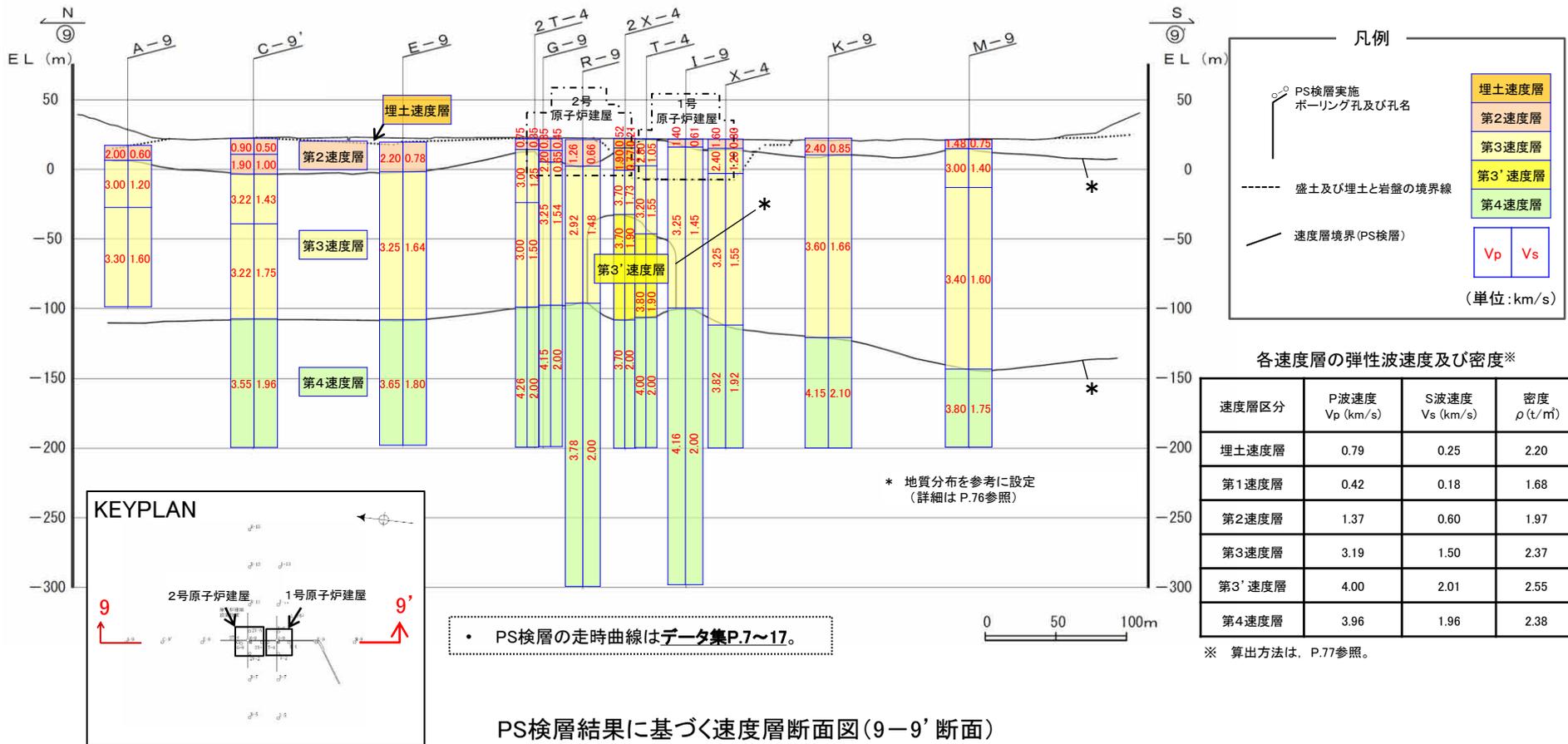


• PS検層の走時曲線はデータ集P.7~17。

PS検層結果に基づく速度層断面図(I-I'断面)

調査結果(9-9'断面)

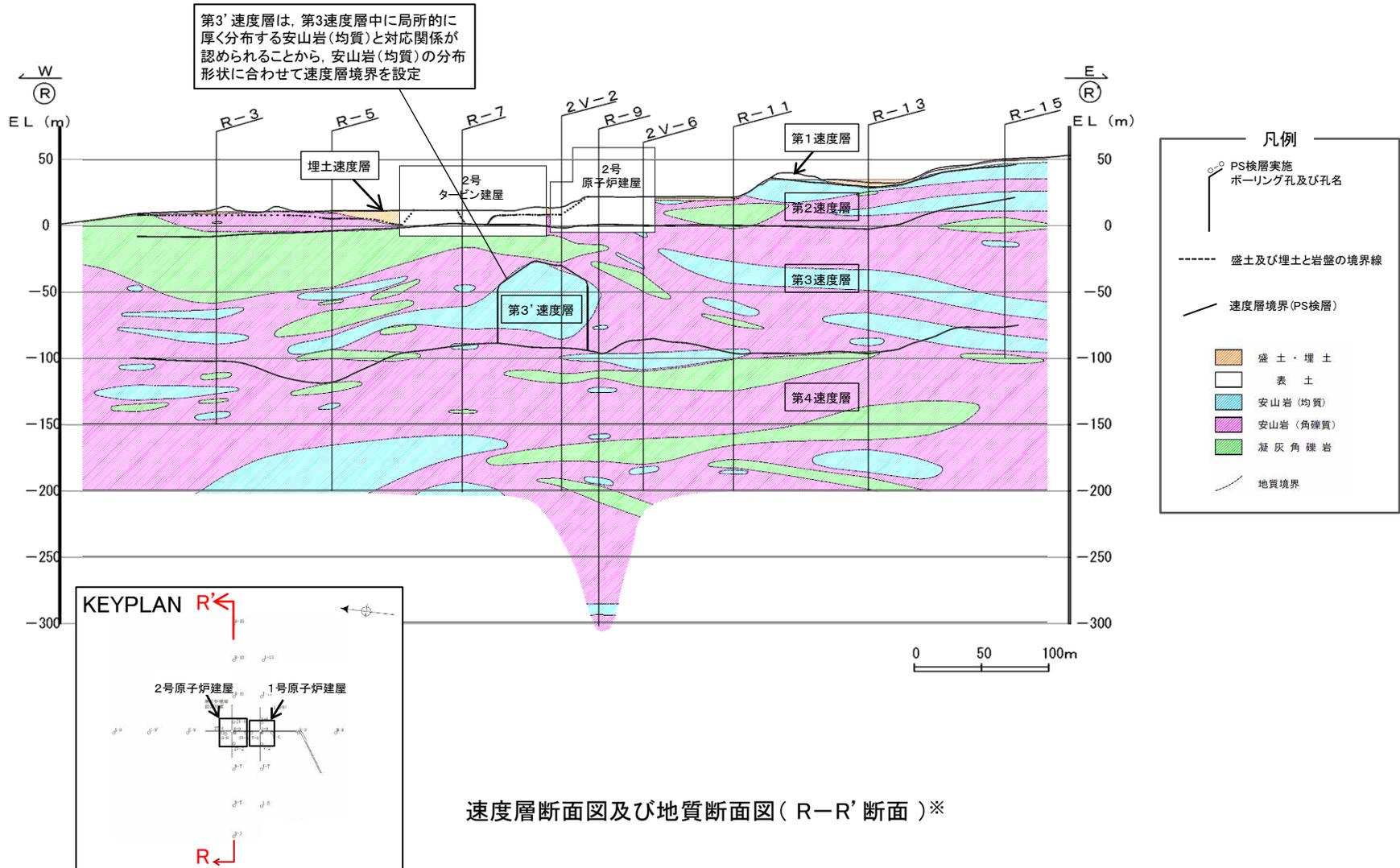
- 原子炉設置位置付近の南北方向(9-9'断面)の速度層区分は、PS検層実施孔で得られた弾性波速度(V_p , V_s)を踏まえ、埋土速度層及び第2速度層から第4速度層に区分し、第3速度層中において周囲と異なる速度特性(周囲に比べて速度が大きい)を示す範囲を第3'速度層とした。なお、第3'速度層は、第3速度層中に局部的に厚く分布する安山岩(均質)と対応関係が認められる(P.76)。
- 速度層境界は、各孔で得られた速度層境界標高をなめらかに結んだ。
- 浅層ボーリングPS検層結果によれば、原子炉設置位置付近の南北方向(9-9'断面)の速度構造は、概ね水平な層構造を呈す。



➤ 浅層ボーリングPS検層結果(R断面, I断面, 9断面)によれば、原子炉設置位置付近のEL-200m以浅の速度構造は、概ね水平な層構造を呈すものの、周囲と異なる速度特性を示す範囲として、第3'速度層及び第4'速度層が認められる。

速度層断面図と地質断面図の重ね合わせ(R-R'断面)

【速度層断面図と地質断面図の重ね合わせ(R-R'断面)】

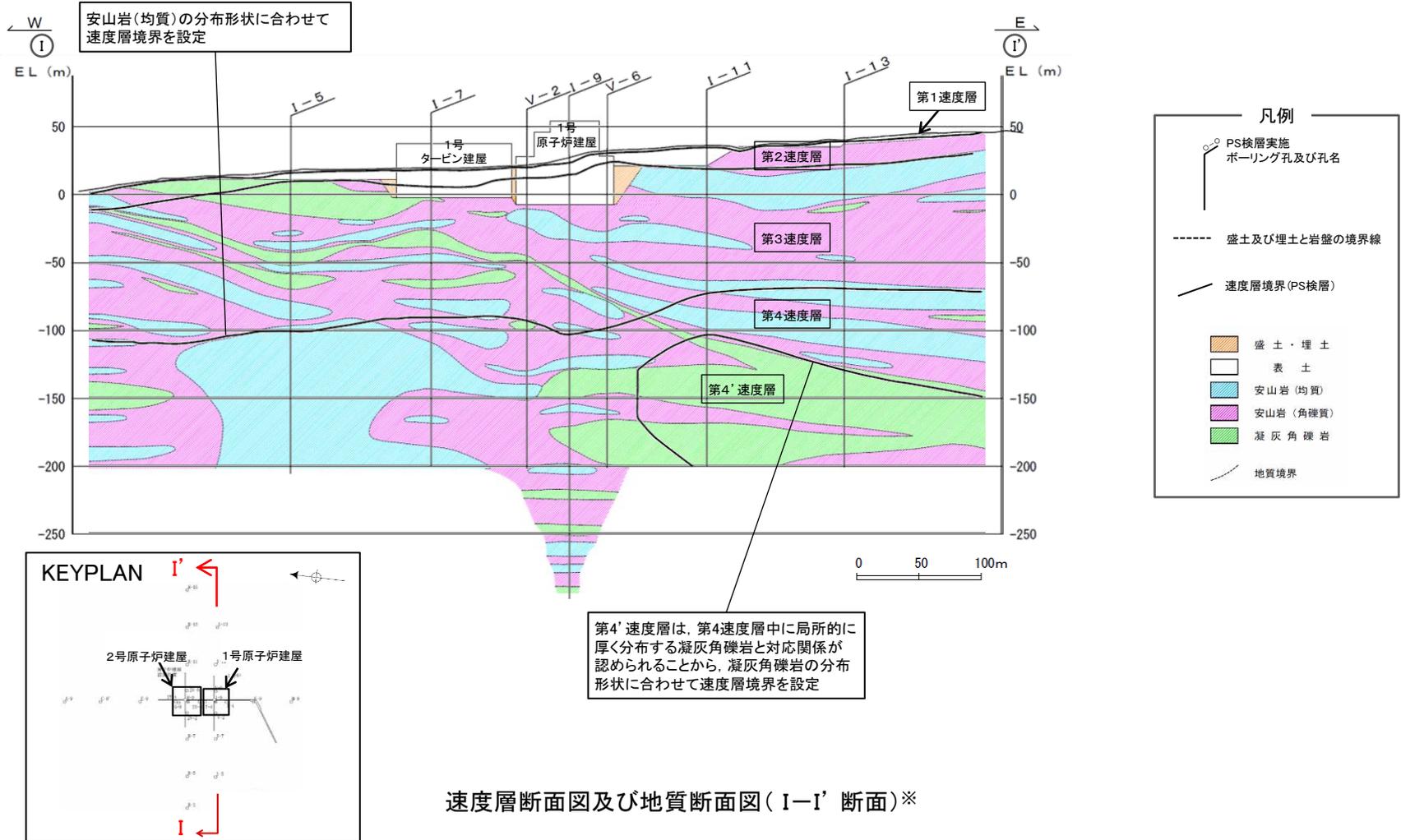


速度層断面図及び地質断面図(R-R'断面)※

※ 速度層断面図は速度層断面作成時の地形
地質断面図は現地形

速度層断面図と地質断面図の重ね合わせ(I-I'断面)

【速度層断面図と地質断面図の重ね合わせ(I-I'断面)】

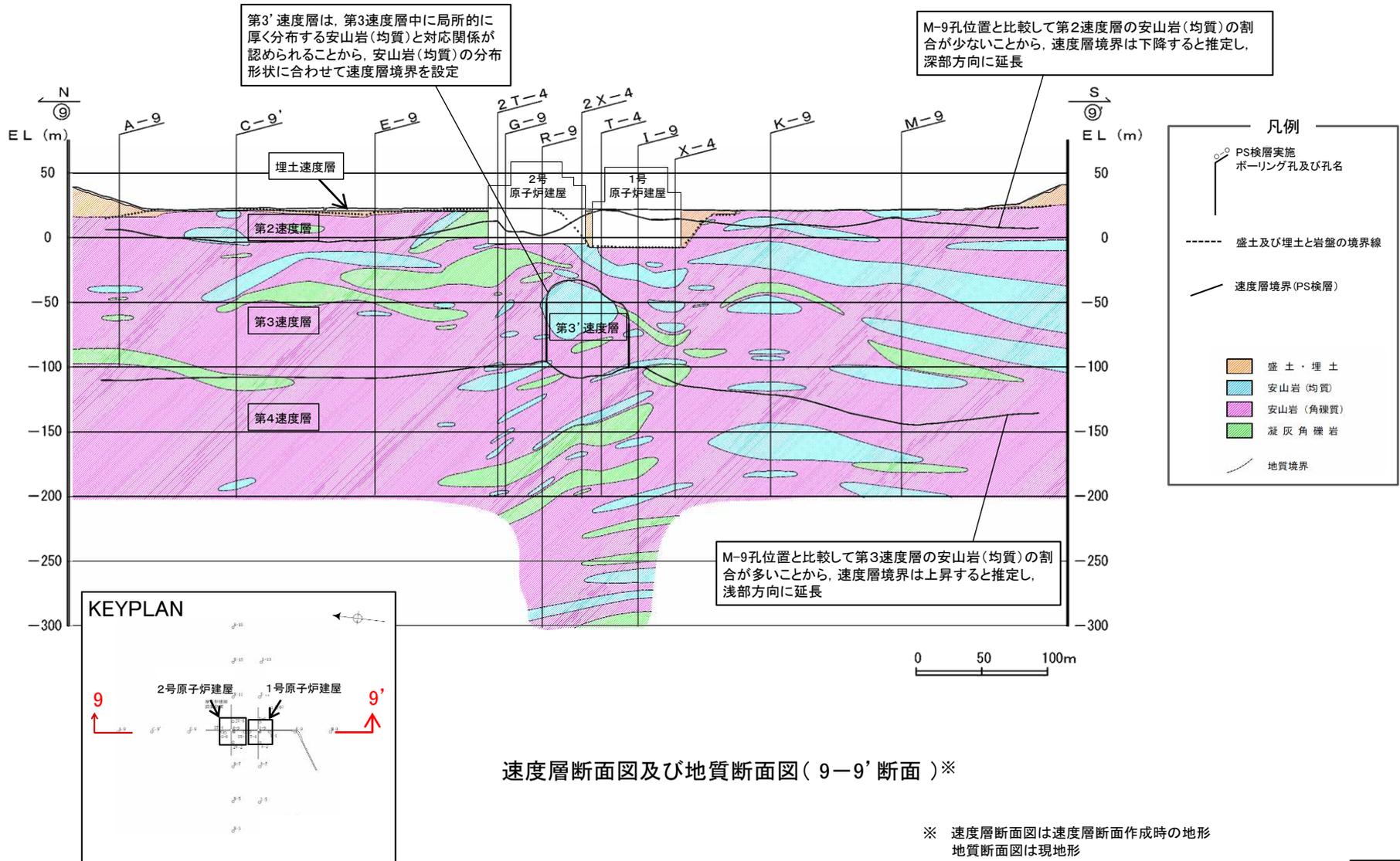


速度層断面図及び地質断面図(I-I'断面)※

※ 速度層断面図は速度層断面作成時の地形
地質断面図は現地形

速度層断面図と地質断面図の重ね合わせ(9-9'断面)

【速度層断面図と地質断面図の重ね合わせ(9-9'断面)】



EL-200m以浅の各速度層の弾性波速度及び密度の算出方法

【EL-200m以浅の各速度層の弾性波速度及び密度の算出方法】

■ 弾性波速度 (Vp, Vs)

各速度層の弾性波速度 (Vp, Vs) は、各速度層の全層厚を全伝播時間で割ることにより算出している。

$$\text{各速度層の弾性波速度 } V = \frac{\sum L_i}{\sum t_i}$$

ここに、
L_i : 速度層の層厚
t_i : 速度層の伝播時間

■ 密度 (ρ)

各速度層の密度(ρ)は、埋土・第1・第2速度層は全層を1区間とし、第3・第4・第3'・第4'速度層は深度方向に概ね20mを1区間として細分化し、地質の密度と区間毎の地質の分布割合をもとに算出している。

$$\text{各速度層の密度 } \rho = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho'_j, \quad \rho'_j = \frac{\sum(\ell_j \times \rho_{\text{地質}})}{L_j}$$

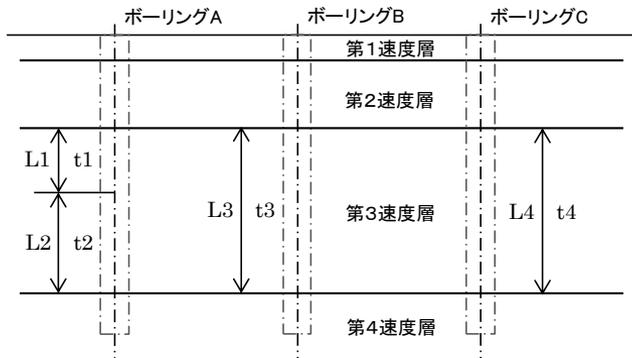
ここに、
ρ'_j : 1区間の平均密度
n : 区間数
ℓ_j : 1区間における地質毎の長さ
ρ_{地質} : 地質毎の密度 (右表)
L_j : 1区間の長さ

地質毎の密度

地質	岩級区分	密度※1 ρ (t/m ³)
安山岩(均質)	[Ba]	2.68
安山岩(角礫質)	[Bb]	2.27
凝灰角礫岩		2.28
安山岩(均質)	[Ca]	2.38
安山岩(角礫質)	[Cb]	2.16
凝灰角礫岩		2.13
安山岩(均質)	[Da]	1.53
安山岩(角礫質)	[Db]	1.51
凝灰角礫岩		1.51※2
表土		1.75
埋土		2.20

※1 敷地で実施した試験結果に基づき設定

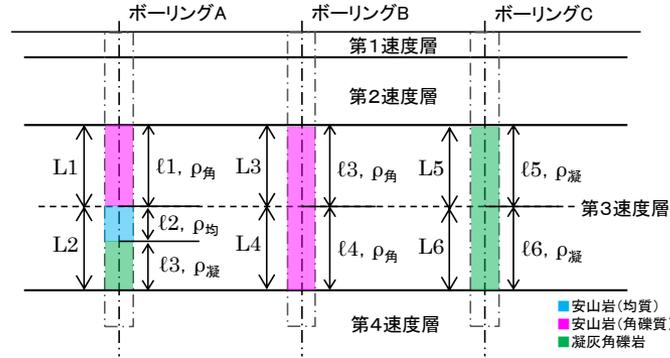
※2 分布範囲が小さく試験を実施していない凝灰角礫岩[Db級]については、凝灰角礫岩[Bb級]及び[Cb級]と安山岩(角礫質)[Bb級]及び[Cb級]の密度値がそれぞれ同程度であることを踏まえ、安山岩(角礫質)[Db級]と同一の値としている。



上図における第3速度層の弾性波速度の算出例

$$V = \frac{L1 + L2 + L3 + L4}{t1 + t2 + t3 + t4}$$

イメージ図



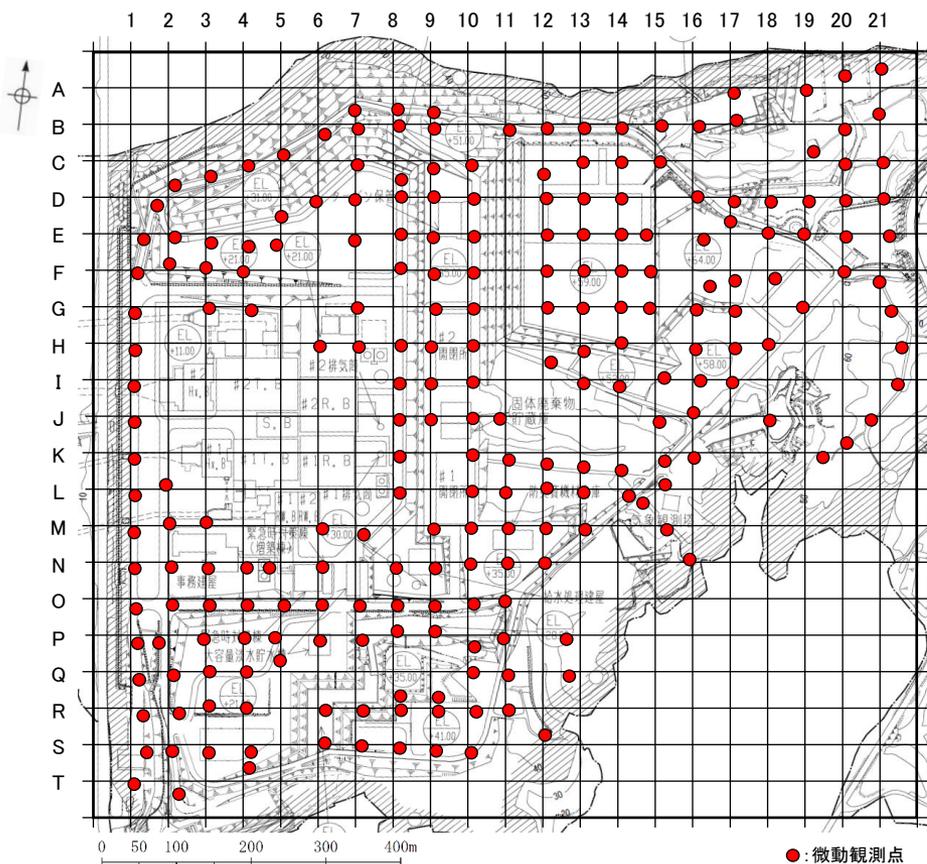
上図における第3速度層の密度の算出例

$$\rho = \frac{1}{6} \times \left\{ \frac{(\ell1 \times \rho_{\text{角}})}{L1} + \frac{(\ell2 \times \rho_{\text{均}}) + (\ell3 \times \rho_{\text{凝}})}{L2} + \frac{(\ell3 \times \rho_{\text{角}})}{L3} + \dots \right\}$$

イメージ図

第3速度層上面形状の検討 - 検討方法 -

- 原子炉設置位置周辺においてS波速度が0.7km/s程度以上の硬質地盤である第3速度層($V_s=1.5\text{km/s}$)上面の形状を把握するため、敷地の複数の観測点で、地下の速度構造が反映されている単点微動観測記録に基づくH/Vスペクトル比(以下、「微動H/Vスペクトル比」という)を用いた逆解析により、第3速度層上面の標高を推定した。なお、逆解析は、1層目を第2速度層($V_s=0.6\text{km/s}$)、基盤層を第3速度層とした2層構造を仮定して、各観測点の理論H/Vスペクトル比が微動H/Vスペクトル比に周期0.1~1秒でフィッティングする1層目の層厚を探索することで実施した。
- 微動観測は敷地の232地点※(約50m間隔)において、2014年1月13日~23日の期間の中で実施した。微動観測点配置図及び微動計の仕様を示す。



微動観測点配置図

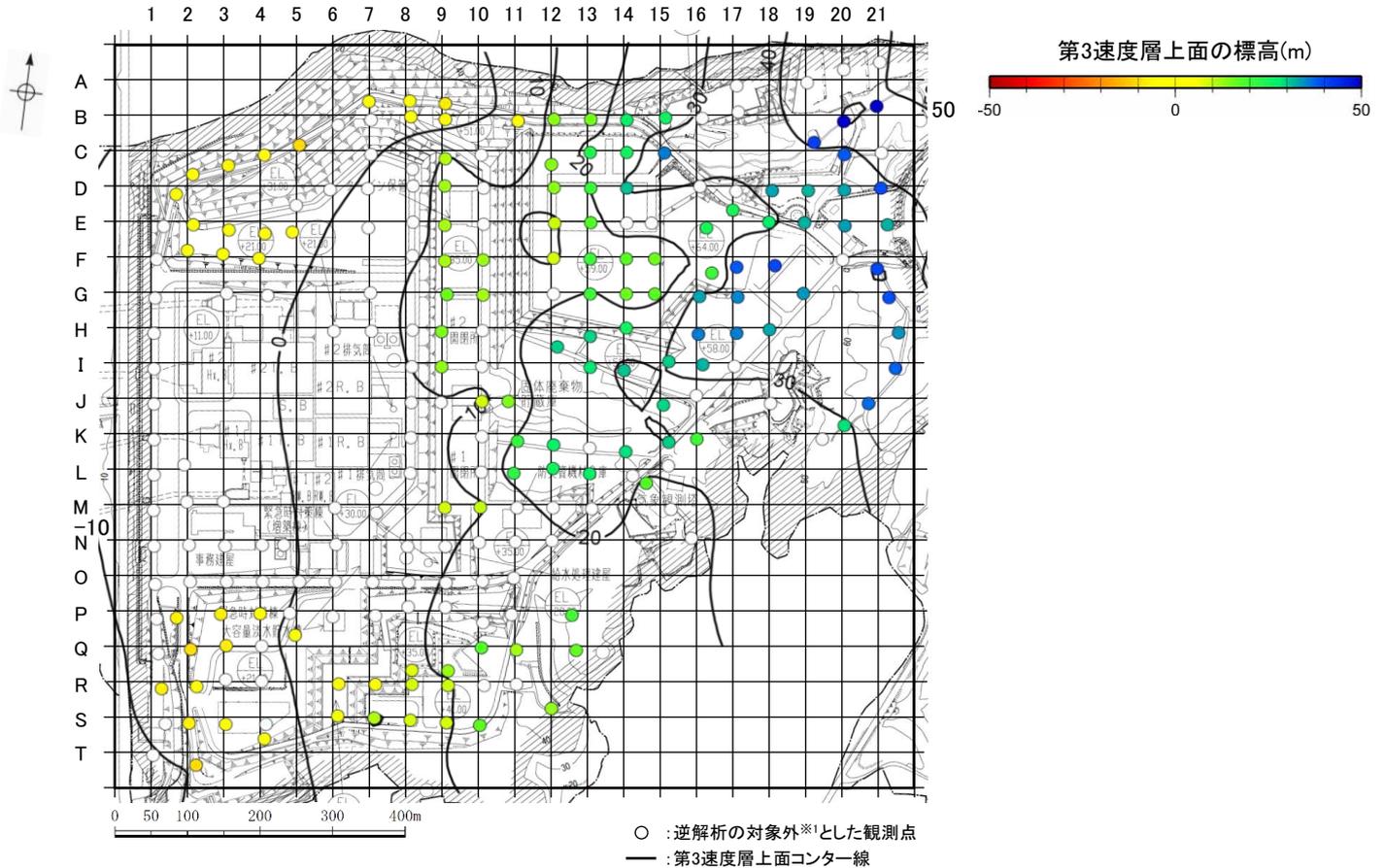
微動計の仕様

項目		仕様
地震計	名称	LE-3D/5S 改
	製造会社	レナーツ社(独)
	成分	3成分(水平動2成分・上下動1成分)
	固有周期	5/7秒切り替え式
	電圧	DC12V
	出力感度	4V/kine
	センサー形式	速度型
収録装置	名称	LS-8000
	製造会社	白山工業
	チャンネル数	3
	分解能	24bit
	サンプリング周波数	100Hz
電源		DC6~16V
周波数範囲(周波数帯域)		0.14~50Hz

※ 微動観測点は、敷地において約50m間隔に設置することを基本としているが、施設の設置状況や工事状況等を考慮して配置した。

第3速度層上面形状の検討 - 検討結果 -

○ 微動H/Vスペクトル比を用いた逆解析により推定した各観測点の第3速度層上面の標高を下図に示す。



微動H/Vスペクトル比を用いた逆解析により推定した第3速度層上面の標高^{※2}

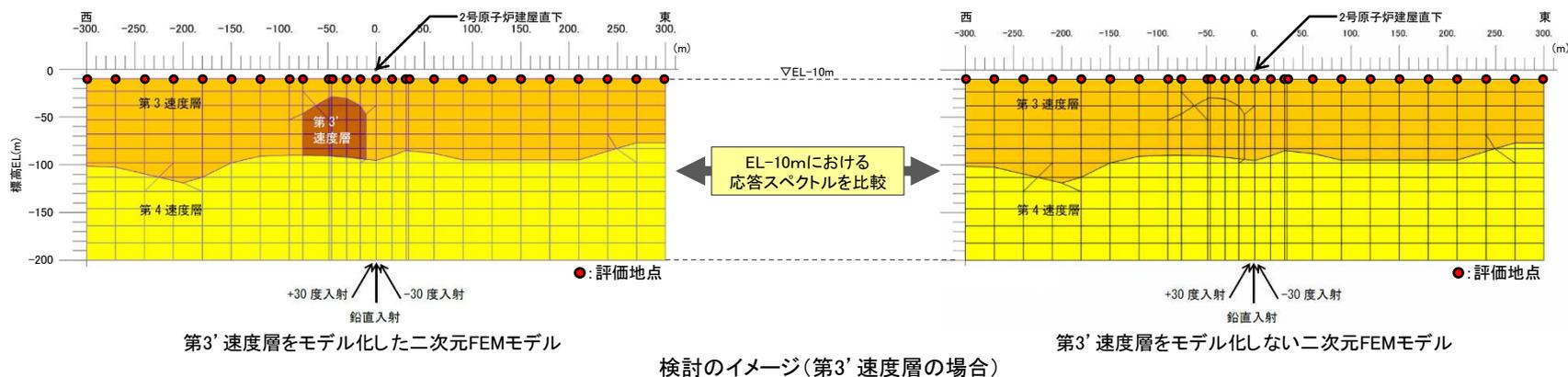
※1 微動H/Vスペクトル比の周期0.1~1秒に明瞭なピークがみられない観測点については、逆解析の対象外とした。

※2 各観測点の微動H/Vスペクトル比と逆解析結果の比較は、データ集P.161~168。

➤ 微動H/Vスペクトル比を用いた逆解析の検討結果を踏まえると、原子炉設置位置周辺の第3速度層上面はEL-10m以浅に位置しており、顕著な不整形はみられない。

第3'速度層・第4'速度層の影響検討 - 検討方法 -

- 原子炉設置位置付近のEL-200m以浅の速度構造は概ね水平な層構造を呈すものの、周囲と異なる速度特性を示す範囲として、第3'速度層及び第4'速度層が認められることから、二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討を実施するとともに、1.3節の観測記録を用いた検討の結果も踏まえ、第3'速度層及び第4'速度層が地震動へ与える影響を検討した。
- 地震動シミュレーションによる検討は、第3'速度層または第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル※と第3'速度層または第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデル※にそれぞれ地震波を入力し、第3'速度層が概ね水平に広がっているEL-10mにおける応答スペクトルを比較することで行った。
- 広帯域で第3'速度層及び第4'速度層の影響を確認するため、検討に用いる地震波は申請時の基準地震動Ss-1とした。また地震波の入射方向については敷地近傍の福浦断層等の断層面の位置を考慮し、鉛直入射及び斜め入射(±30°)した場合の検討を行った。検討のイメージと速度層の地盤物性を下記に示す。
- なお、第3'速度層は原子炉設置位置付近の速度構造のR-R'断面及び9-9'断面の両断面にみられるが、第3'速度層の大きさ及び位置に大きな違いはないことから、ここではR-R'断面を代表として検討を行った。



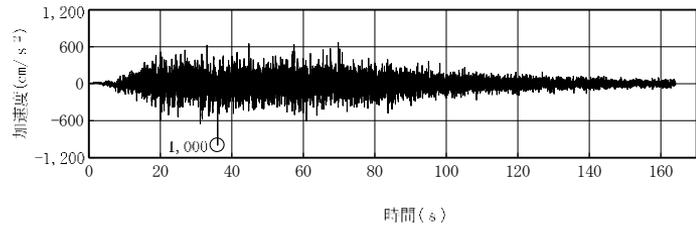
第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデル

検討のイメージ(第3'速度層の場合)

第3'速度層をモデル化しない二次元FEMモデル

速度層の地盤物性

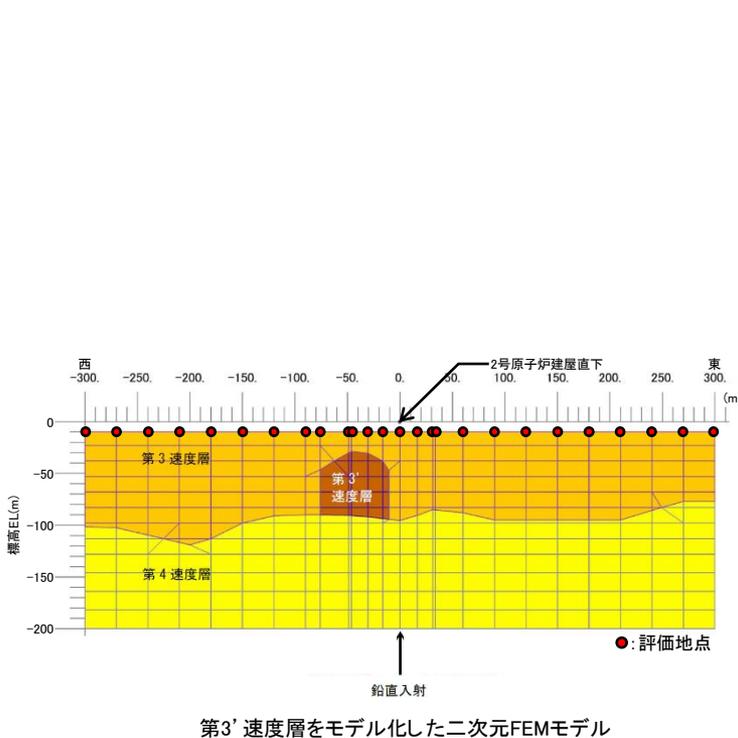
層区分	Vs (km/s)	Vp (km/s)	密度 (t/m ³)
第3速度層	1.50	3.19	2.37
第3'速度層	2.01	4.00	2.55
第4速度層	1.96	3.96	2.38
第4'速度層	1.63	3.45	2.29



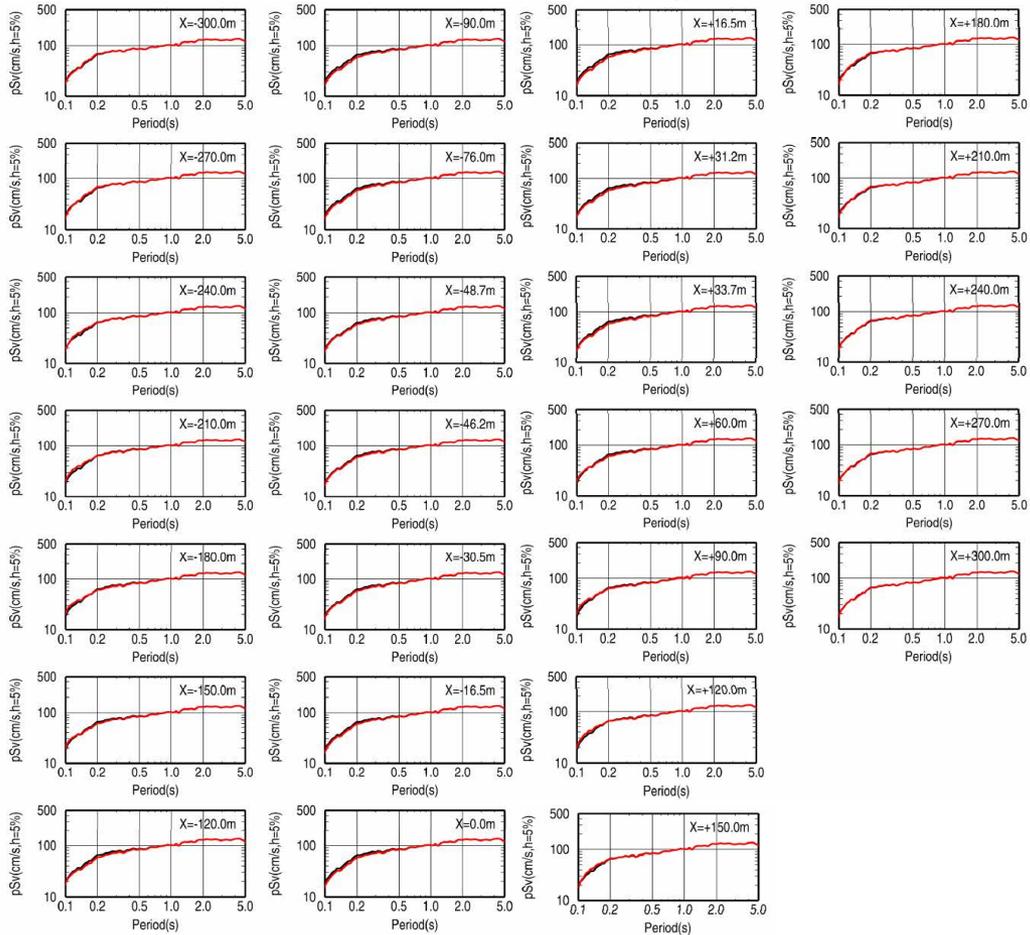
検討に用いる地震波(申請時の基準地震動Ss-1)

※二次元FEMモデルの側面及び底面への波動の逸散を考慮するため、側面はエネルギー伝達境界を設定し、側面境界は遠くは、水平成層地盤として仮定する。また、底面は粘性境界を設定し、EL-200m以深の底面物性は第4速度層の値を用いる。

○ 第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデルと第3'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルに鉛直入射した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果、いずれの周期についても顕著な違いはみられない。



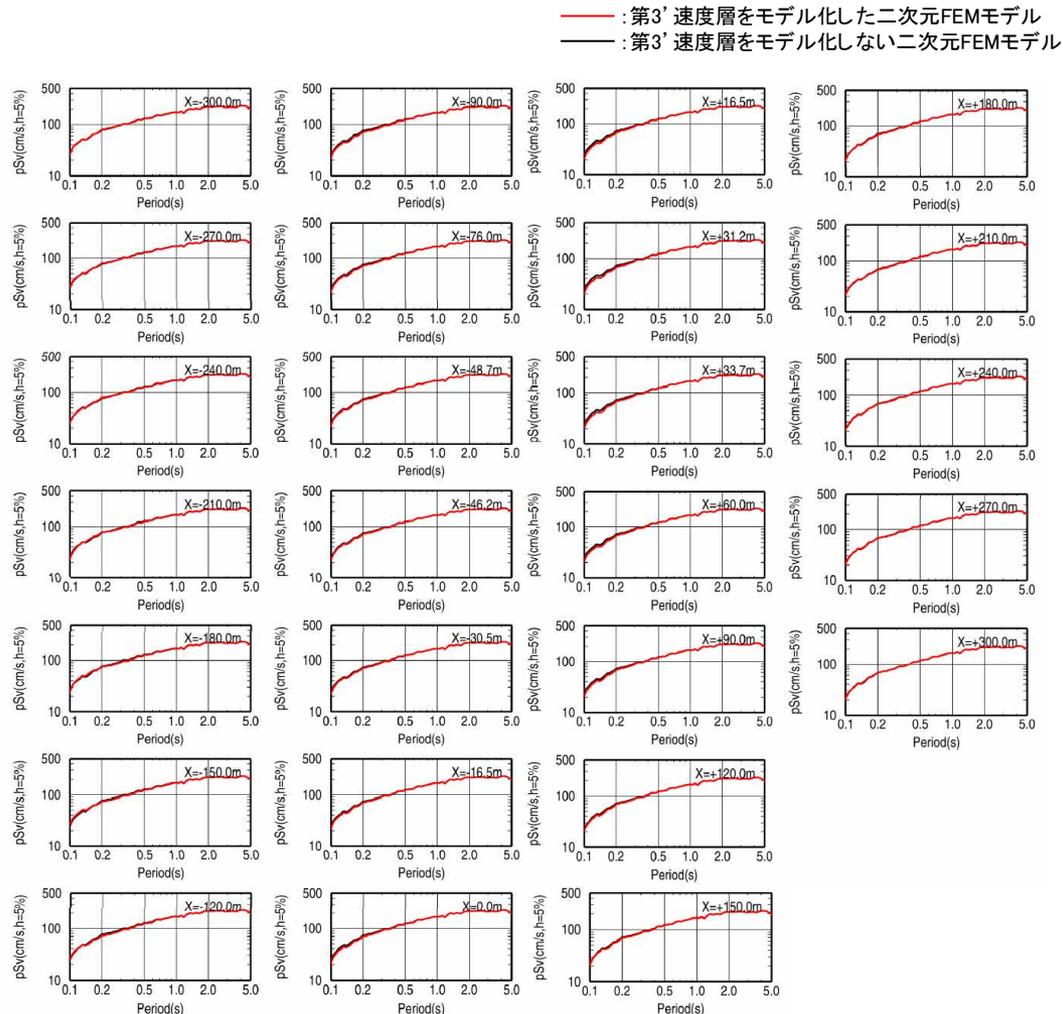
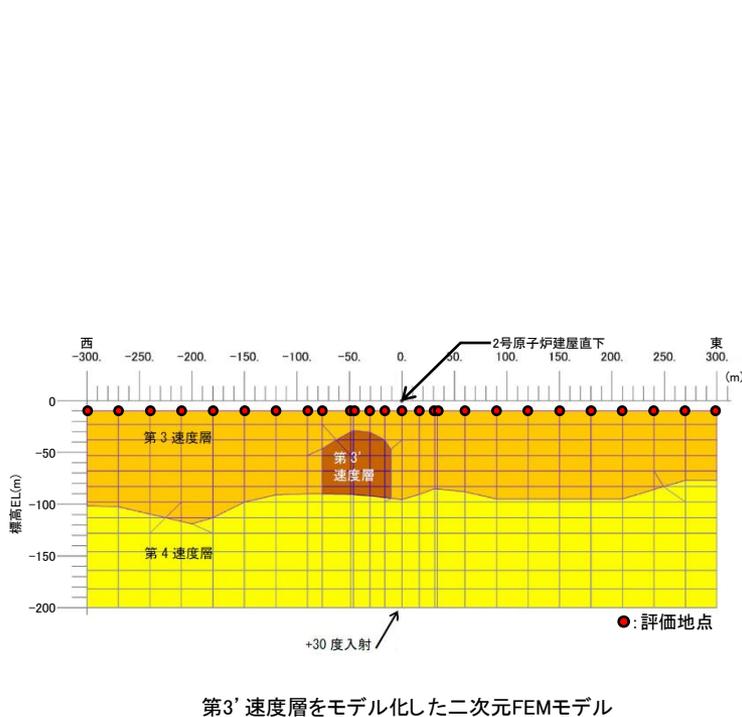
— : 第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデル
 — : 第3'速度層をモデル化しない二次元FEMモデル



各評価地点の応答スペクトル

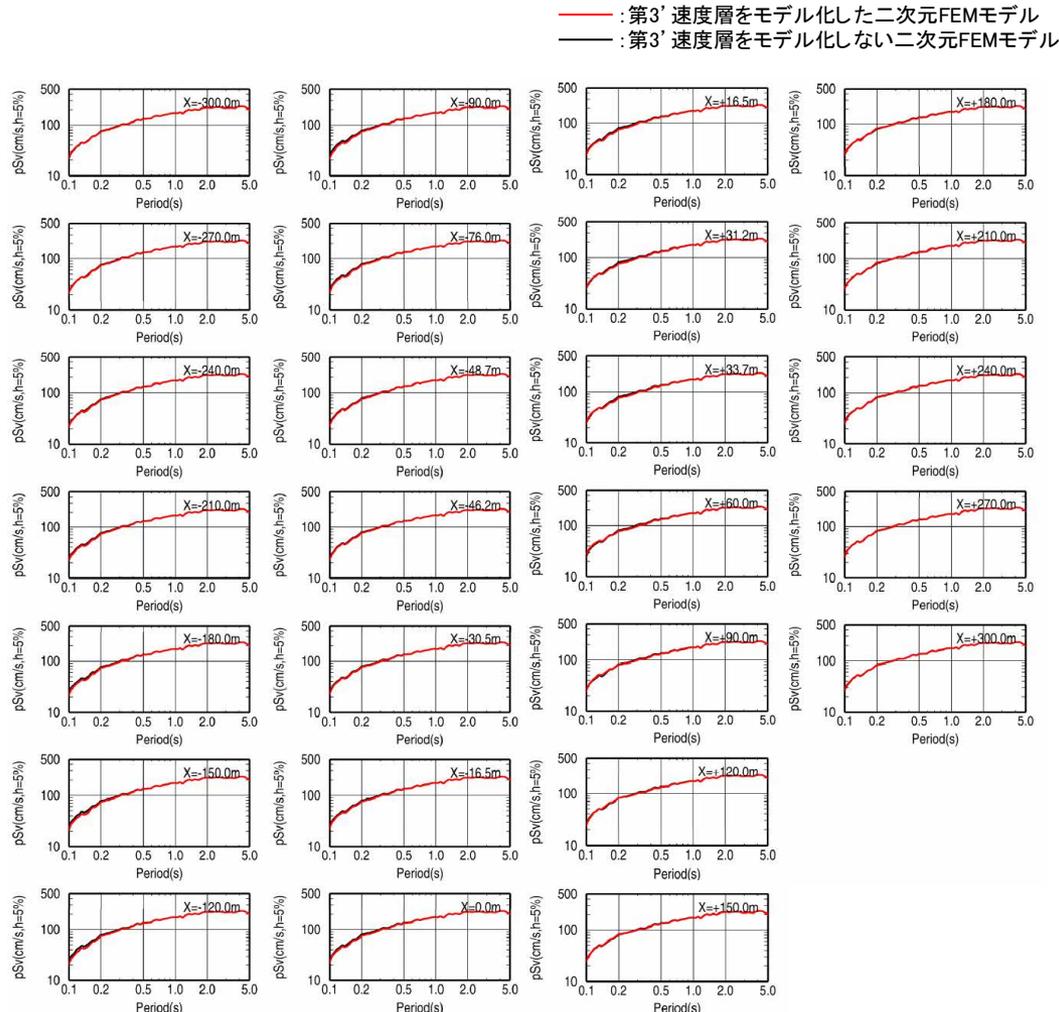
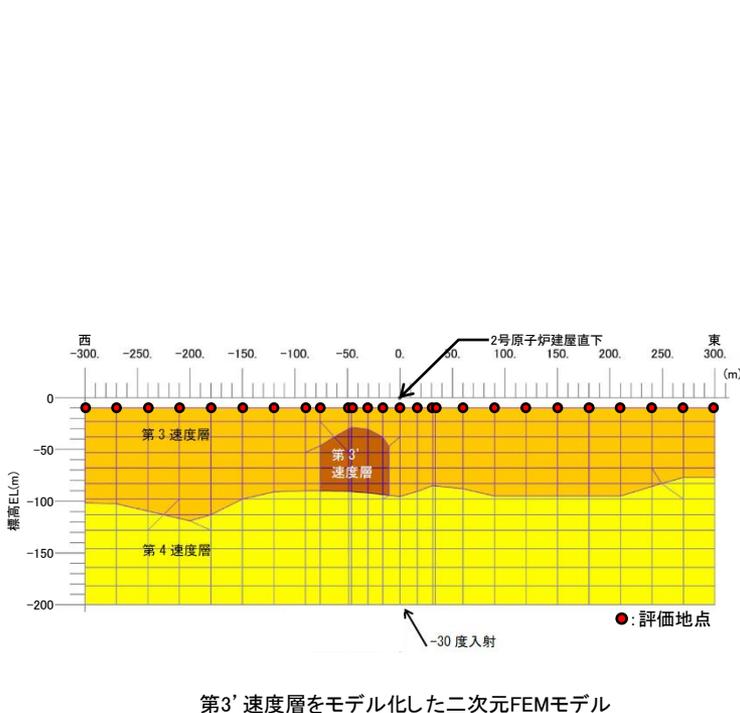
※ モデル図は便宜上、第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

○ 第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデルと第3'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルに斜め入射(+30°)した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果, 鉛直入射の場合と同様, いずれの周期についても顕著な違いはみられない。



各評価地点の応答スペクトル

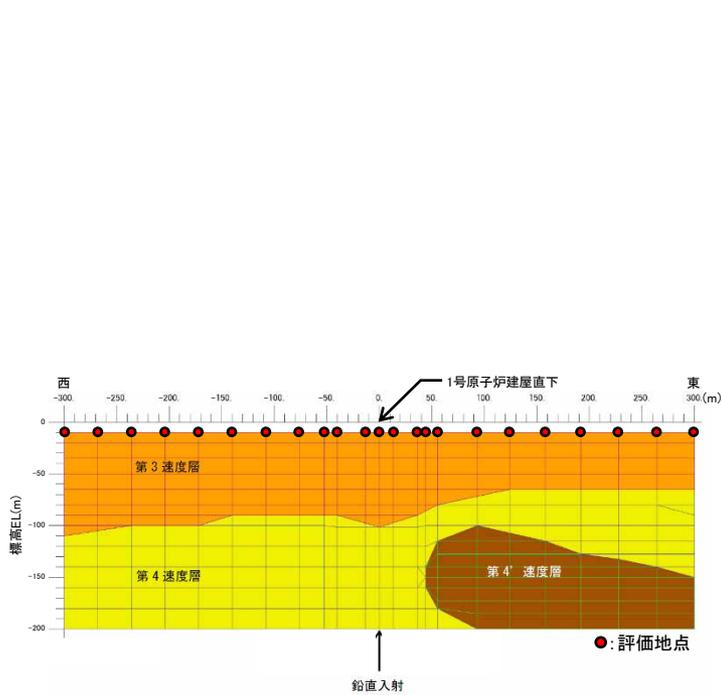
○ 第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデルと第3'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルに斜め入射(-30°)した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果, 鉛直入射の場合と同様, いずれの周期についても顕著な違いはみられない。



各評価地点の応答スペクトル

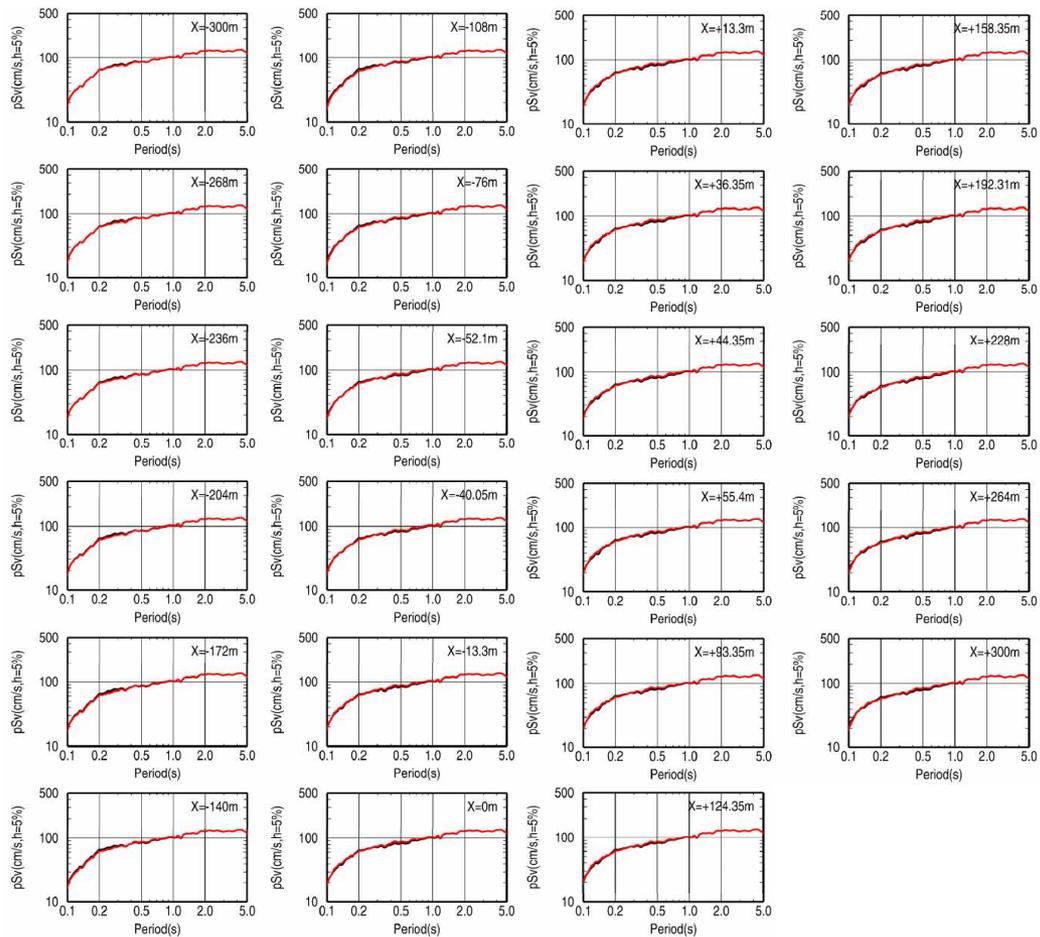
※ モデル図は便宜上, 第3'速度層をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

○ 第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデルと第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルに鉛直入射した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果、いずれの周期についても顕著な違いはみられない。



第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル

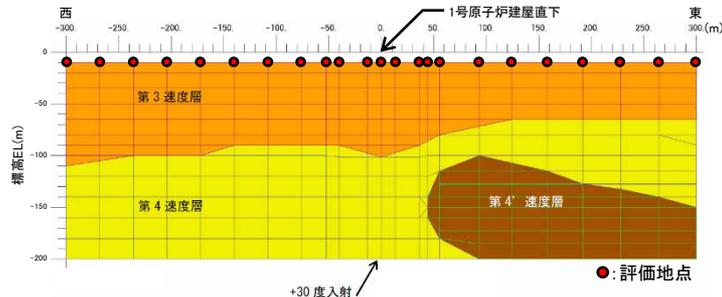
— : 第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル
 — : 第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデル



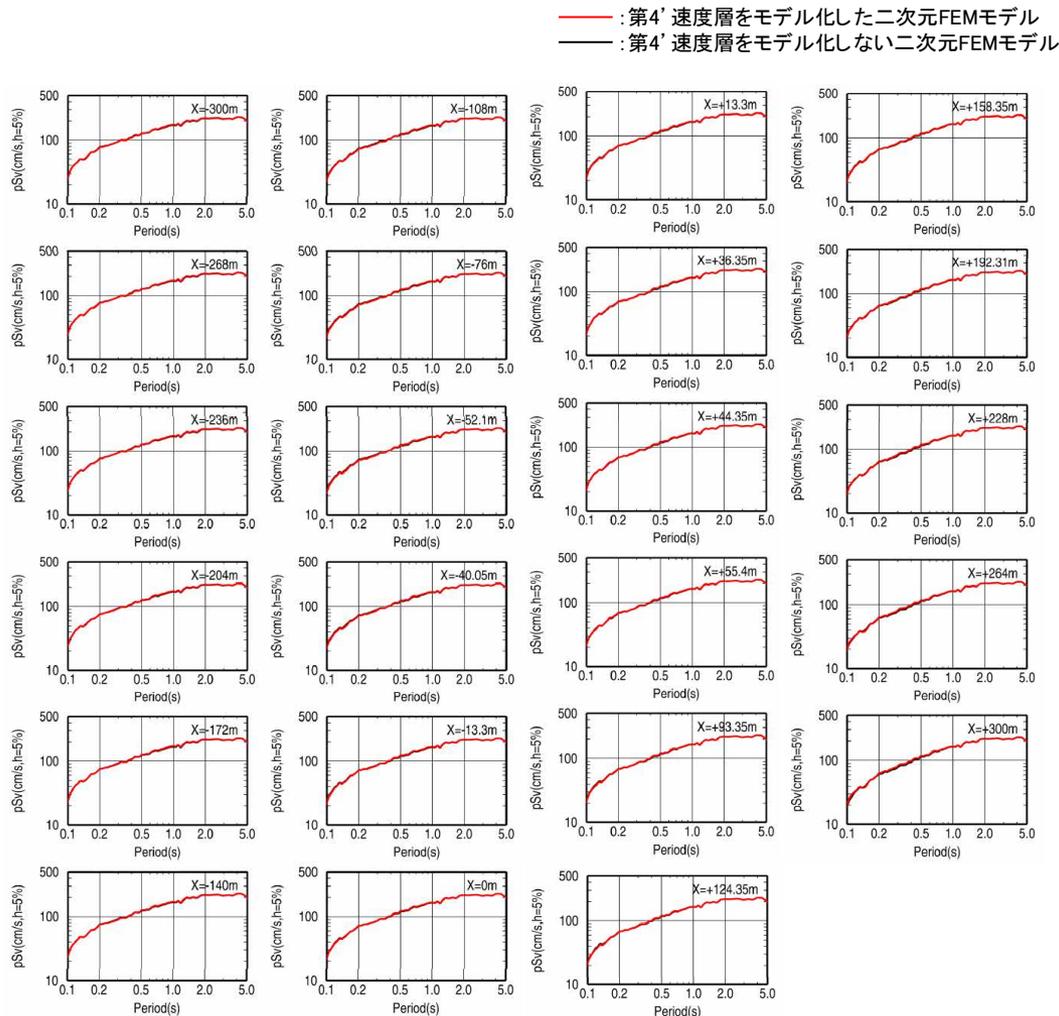
各評価地点の応答スペクトル

※ モデル図は便宜上、第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

○ 第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデルと第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルに斜め入射(+30°)した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果, 鉛直入射の場合と同様, いずれの周期についても顕著な違いはみられない。



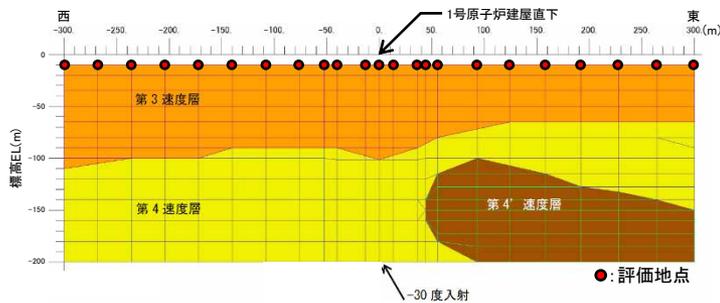
第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル



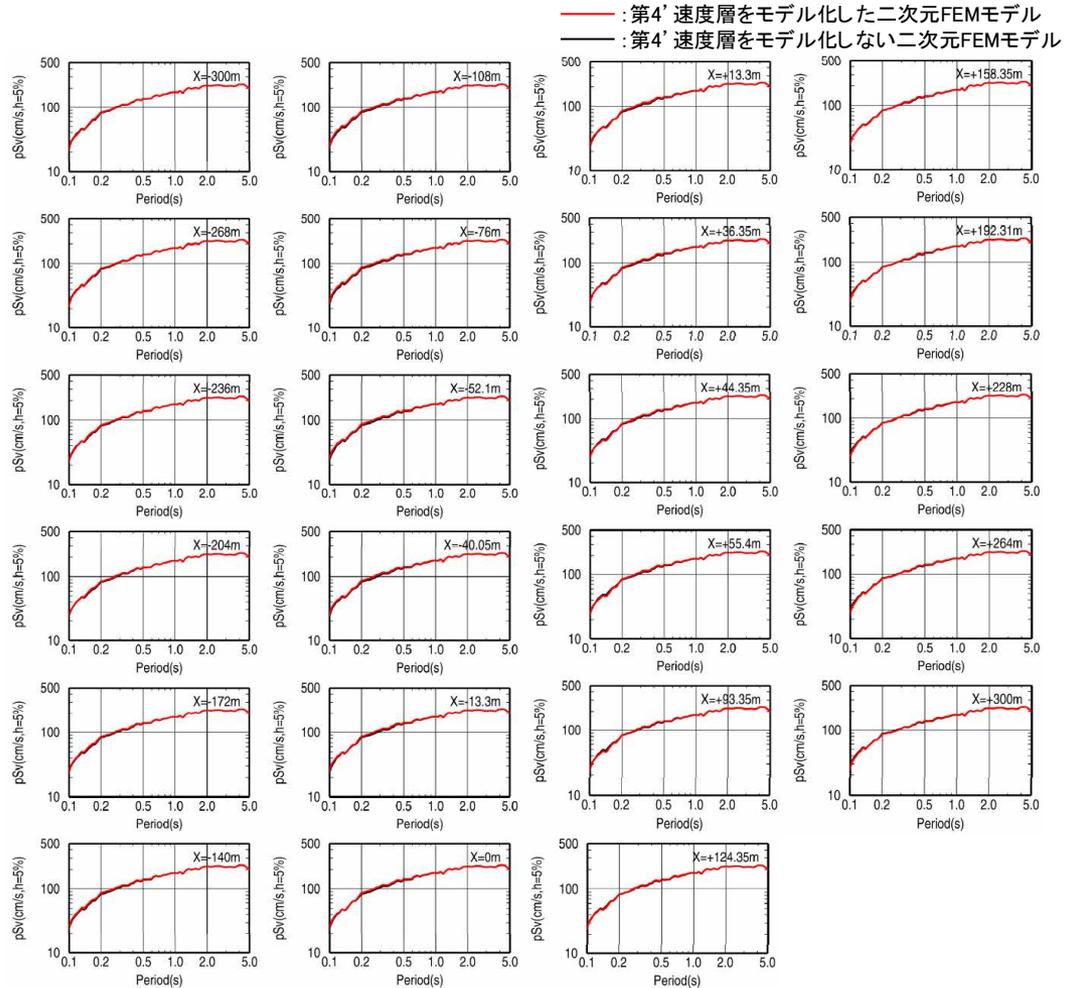
各評価地点の応答スペクトル

※ モデル図は便宜上, 第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

○ 第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデルと第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルに斜め入射(-30°)した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果, 鉛直入射の場合と同様, いずれの周期についても顕著な違いはみられない。



第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル



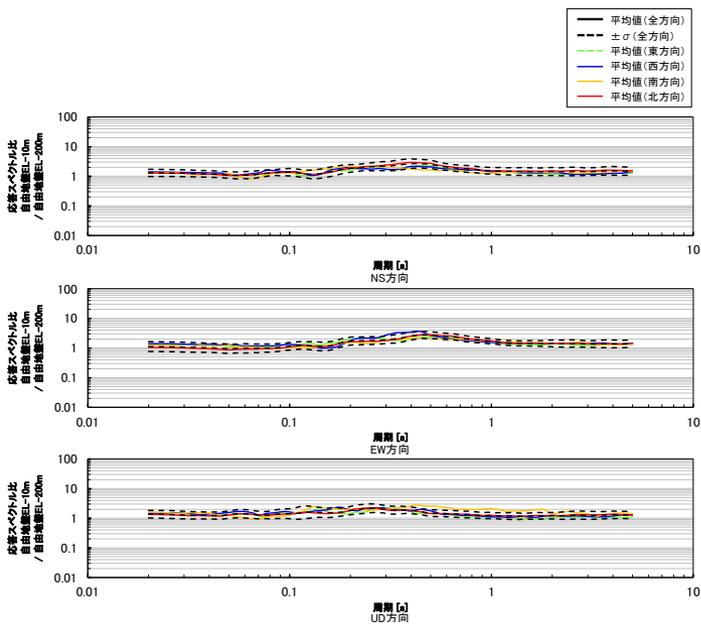
各評価地点の応答スペクトル

※ モデル図は便宜上, 第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

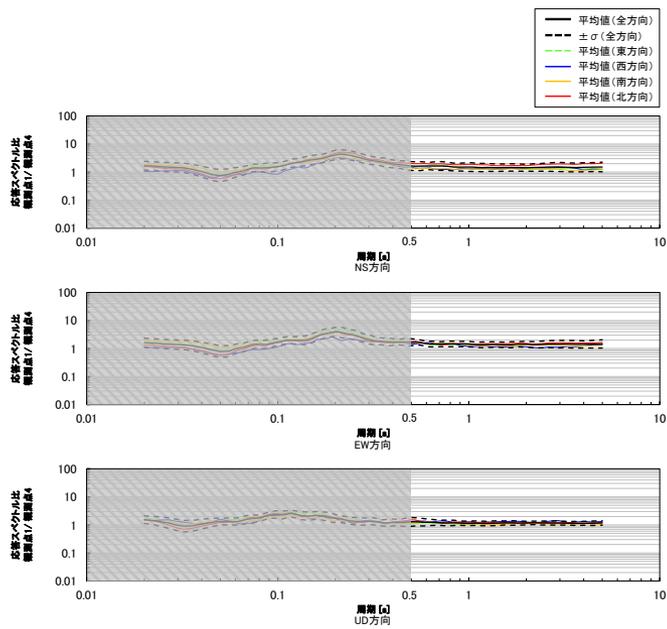
○ 二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果によれば, 第3'速度層または第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル及び第3'速度層または第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルによる応答に顕著な違いはみられない。

第3' 速度層・第4' 速度層の影響検討 — 観測記録を用いた検討結果(1.3節) —

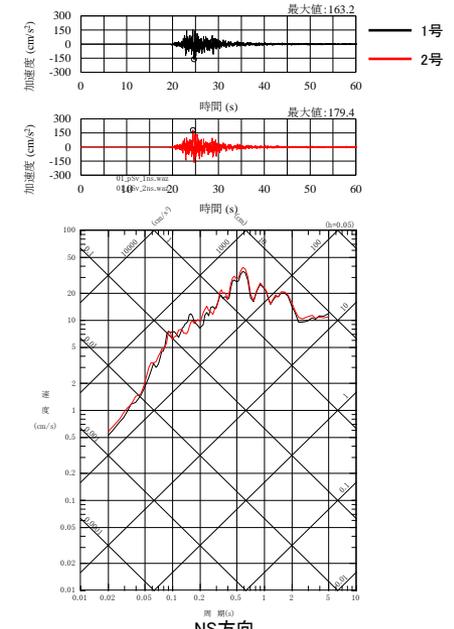
- 第3' 速度層・第4' 速度層が地震動へ与える影響を検討するため、1.3節において実施した観測記録を用いた検討結果を確認した。
- 敷地のEL-200m～解放基盤表面を対象とした鉛直アレー地震観測記録(到来方向別)を用いた検討結果(1.3.2項(P.156))によれば、自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはないことから、自由地盤地震観測点周辺のEL-10m～EL-200mに、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。
- 敷地の地震基盤以浅を対象とした水平アレー地震観測記録(地表)(到来方向別)を用いた検討結果(1.3.3項(P.162))によれば、観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1～4周辺の地震基盤以浅(表層地盤を除く)に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。
- 敷地の地震基盤以浅を対象とした原子炉建屋基礎版上の地震観測記録を用いた検討結果(1.3.5項(P.176))によれば、加速度時刻歴波形及び応答スペクトルに顕著な違いはないことから、1号原子炉建屋周辺及び2号原子炉建屋周辺の地震基盤以浅に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。



応答スペクトル比(自由地盤EL-10m/自由地盤EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較(1.3.2項)



応答スペクトル比(観測点1/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較(1.3.3項)



(2007年能登半島地震)
1号及び2号原子炉建屋基礎版上における
加速度時刻歴波形及び応答スペクトルの比較(1.3.5項)

➤ 観測記録を用いた検討(1.3.2項～1.3.3項, 1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果

- 二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果によれば、第3'速度層または第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル及び第3'速度層または第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルによる応答に顕著な違いはみられない。

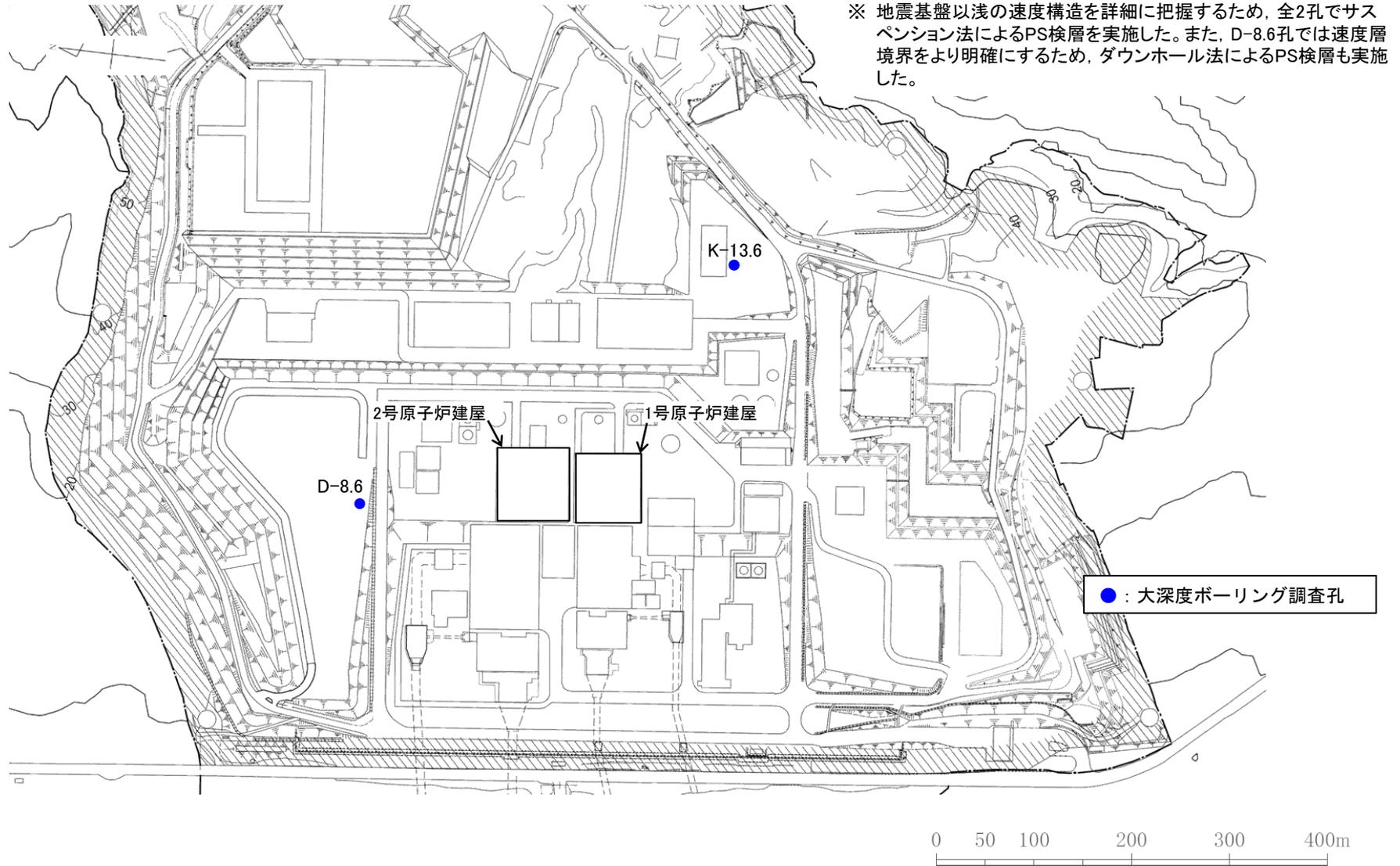
1.3節において実施した観測記録を用いた検討結果

- 観測記録を用いた検討(1.3.2項～1.3.3項, 1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

- 二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果(第3'速度層または第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル及び第3'速度層または第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルによる応答に顕著な違いはみられないこと)及び1.3節において実施した観測記録を用いた検討結果(敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられること)より、第3'速度層及び第4'速度層は、地震動へ与える影響は小さいものと考えられる。

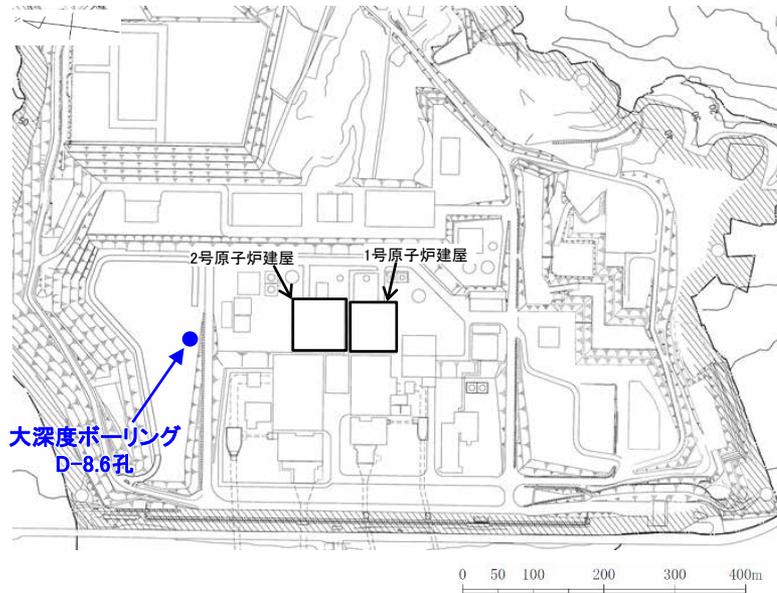
調査位置図

○ 原子炉設置位置付近の地震基盤以浅の地質，速度構造を把握するため，下図に示す2孔で実施した大深度ボーリング調査結果(PS検層※及び密度検層)を確認した。



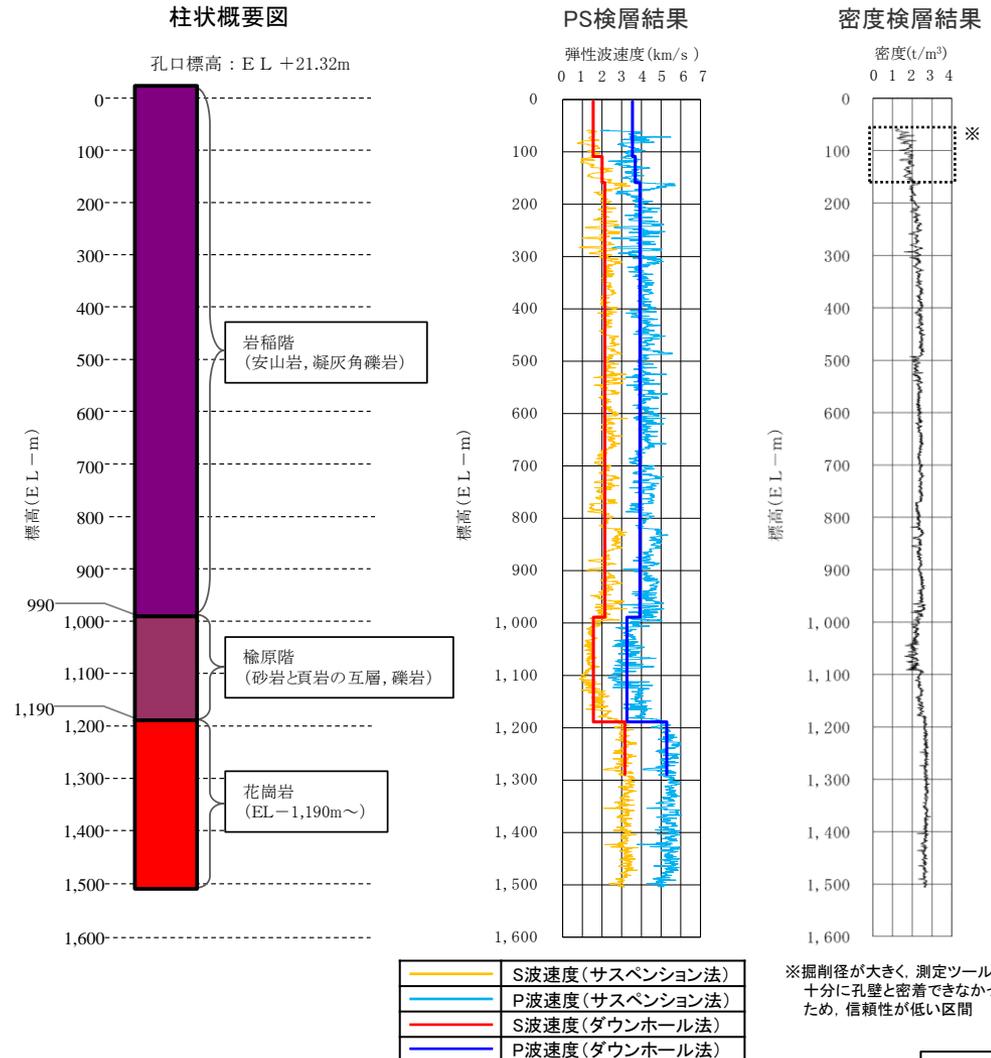
地質、弾性波速度及び密度の調査結果 -D-8.6孔-

- 地質は、下位から先第三紀の花崗岩、古第三紀の楡原階(砂岩と頁岩の互層、礫岩)、新第三紀の岩稲階(安山岩、凝灰角礫岩)からなる。
- PS検層結果による花崗岩上面標高はEL-1,190mであり、P波速度及びS波速度は、花崗岩以浅では4km/s及び2km/s程度、花崗岩以深では5km/s及び3km/s程度を示す。
- 密度検層結果によれば、密度は、浅部区間を除き概ね2~3t/m³の範囲を示す。



大深度ボーリング(D-8.6孔)の調査位置図

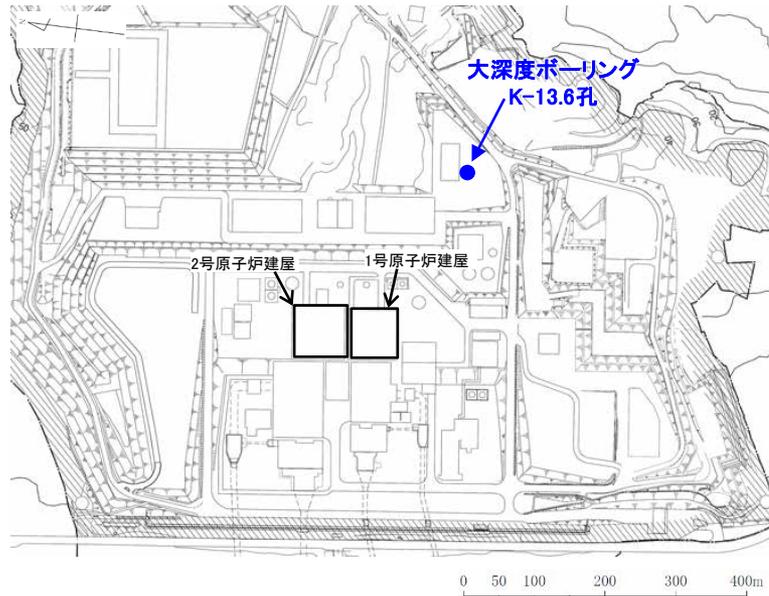
- ・ 大深度ボーリング(D-8.6孔)は、4区間(EL-1,175.68m~EL-1,183.68m, EL-1,275.68m~EL-1,280.78m, EL-1,375.68m~EL-1,380.78m, EL-1,475.98m~EL-1489.08m)でスポットコアリングによるコア採取を行い、それ以外の区間はカッティングス観察(深度20m間隔)を行った。コア写真、柱状図、カッティングス写真はデータ集P.129~137。
- ・ 右の柱状概要図は、PS検層結果により地質境界標高を決定し、コア観察、カッティングス観察により地質を判定した。なお、PS検層結果による花崗岩上面標高EL-1,190mはコア観察による花崗岩上面標高EL-1,181.73mと概ね整合する。PS検層(ダウンホール法)の走時曲線はデータ集P.128。



1.1.5 原子炉設置位置付近の速度構造等(地震基盤以浅)

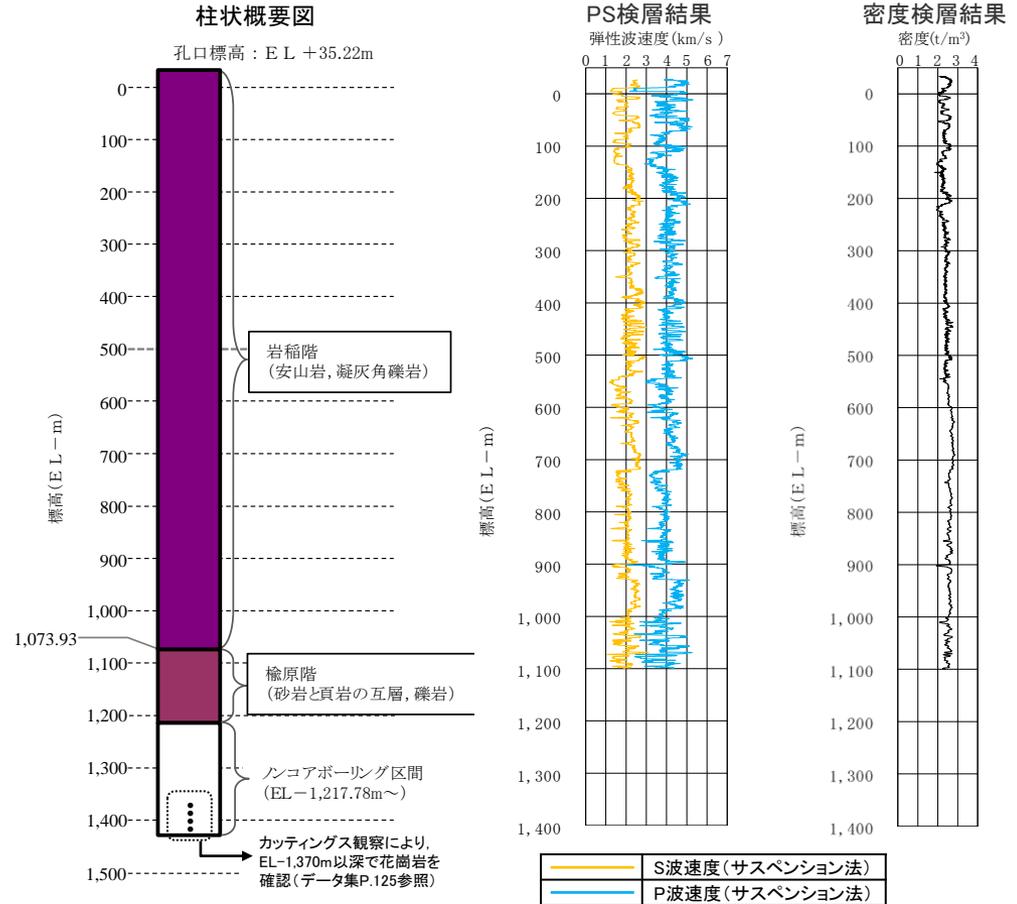
地質、弾性波速度及び密度の調査結果 -K-13.6孔-

- 地質は、下位から古第三紀の榎原階(砂岩と頁岩の互層、礫岩)、新第三紀の岩稲階(安山岩、凝灰角礫岩)からなる。また、花崗岩は、カッティングス観察によれば、EL-1,370m以深に認められる。
- PS検層結果によれば、P波速度及びS波速度は、4km/s及び2km/s程度を示す。
- 密度検層結果によれば、密度は、概ね2~3t/m³の範囲を示す。



大深度ボーリング(K-13.6孔)の調査位置図

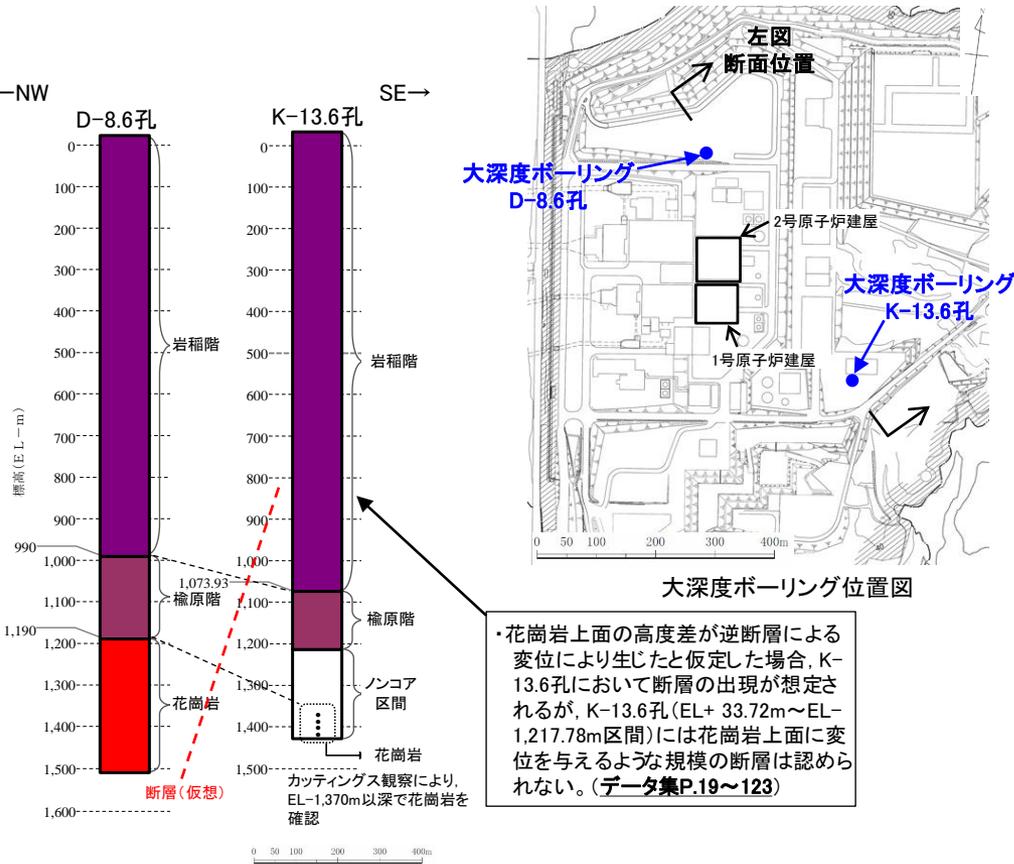
- 大深度ボーリング(K-13.6孔)は、EL+ 33.72m~EL-1,217.78mの区間でオールコアリングによるコア採取を行い、EL-1,217.78m以深の区間については、孔壁崩壊の恐れがあったためノンコアリングにより掘進した。コア写真、柱状図はデータ集P.19~123。



- 大深度ボーリング調査結果(D-8.6孔, K-13.6孔)によれば、原子炉設置位置付近の地震基盤以浅の地質は、下位から先第三紀の花崗岩、古第三紀の榎原階(砂岩と頁岩の互層、礫岩)、新第三紀の岩稲階(安山岩、凝灰角礫岩)からなり、花崗岩以浅におけるP波速度及びS波速度はそれぞれ4km/s及び2km/s程度、花崗岩以深におけるP波速度及びS波速度はそれぞれ5km/s及び3km/s程度であり、密度は概ね2~3t/m³の範囲を示す。
- なお、地下構造モデルの設定においては、より深部まで物性を把握できているD-8.6孔の調査結果(PS検層(ダウンホール法)による速度値及び密度検層による密度値)に基づき設定した。(詳細はP.183参照)

地質, 弾性波速度及び密度の調査結果 - 花崗岩上面の形状の考察(1/3) -

- 約460m離隔している2孔の大深度ボーリング(D-8.6孔及びK-13.6孔)の調査結果において、花崗岩上面に約180mの高度差が認められることから、この花崗岩上面の形状について、以下の通り考察した。
- 大深度ボーリング、重力探査及び反射法地震探査・VSP探査の結果から、敷地には花崗岩上面に変位を与えるような断層は推定されない。
 - ・大深度ボーリングK-13.6孔のコア観察の結果、花崗岩上面に変位を与えるような規模の断層は認められない(左下図, データ集P.19~123)。
 - ・重力探査の結果、敷地近傍に顕著な線状の重力異常急変部は認められず、断層等による基盤標高の急激な変化は推定されない(次頁左図, P.94)。
 - ・反射法地震探査・VSP探査の結果、花崗岩上面に相当する反射面は連続しており、敷地の花崗岩上面に変位を与える断層は認められない(次頁右図①, P.94)。
- 敷地の花崗岩は長期間(1億年以上)にわたり、侵食作用を受けており、敷地周辺には敷地と同様の花崗岩上面の凹凸形状が認められる。
 - ・敷地の花崗岩(約1.9~1.4億年前)は、楡原階の堆積岩(約2500万年前)や、岩稻階の別所岳安山岩類(約2200~1500万年前)に覆われており、上位層が堆積するまでの間の長期間(1億年以上)にわたり、侵食作用を受けていたと推定される(右下図)。
 - ・敷地から海域にかけて連続して測線を配置した反射法地震探査・VSP探査の結果、花崗岩上面に相当する反射面に約200mの高度差が認められる(次頁右図②)。
 - ・敷地周辺には、同様の花崗岩上面の凹凸形状が認められる(次々頁)。
- 以上のことから、2孔の大深度ボーリングで認められた花崗岩上面の高度差は、局所的な断層変位ではなく、侵食作用による凹凸形状であると判断した。



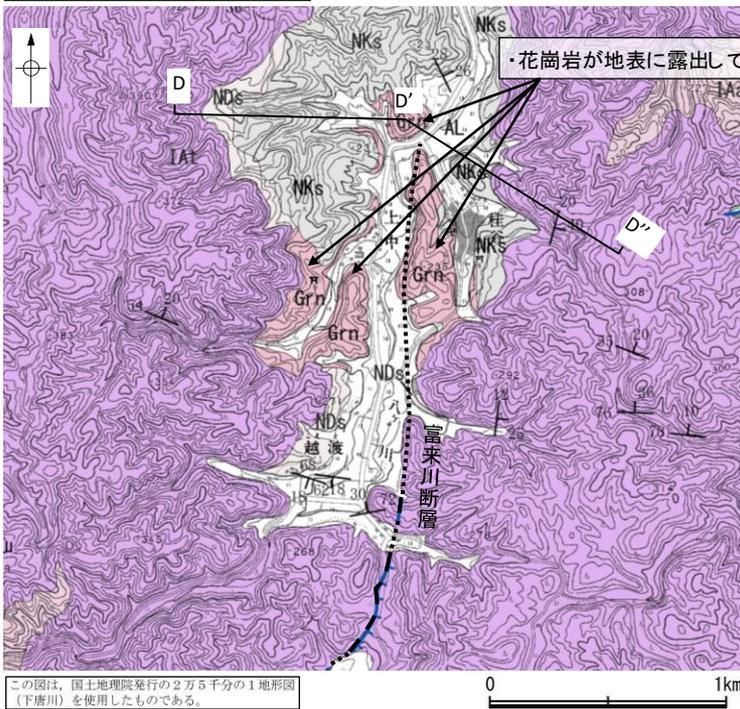
・花崗岩上面の高度差が逆断層による変位により生じた場合、K-13.6孔において断層の出現が想定されるが、K-13.6孔(EL+ 33.72m~EL-1,217.78m区間)には花崗岩上面に変位を与えるような規模の断層は認められない。(データ集P.19~123)

地質年代 (年表) 万年	石川原における 代表的な地層	志賀・七尾・能登島地域	高来・門前・穴水地域
第1紀 更新世	海岸砂丘		
	沖積層		
	扇状地		
	低位段丘	河成段丘	
第2紀 中新世	中位段丘	灌成段丘	灌成段丘
	高位段丘	高階層	高位段丘
	卯辰山層		
	大桑層		
第3紀 新第三紀	嶺山層	嶺山層・小島層	
	赤崎層	赤崎層	
	飯塚層	和倉層	黒崎安山岩
	関野鼻層		関野鼻層
	大聖寺層	赤浦層	
	朝ヶ屋層	須田層	進下層
	砂子坂層	山戸層	別所岳安山岩
	流紋岩類		御地火山岩
	デイサイト類		縄文層
	安山岩類		AL1
古第三紀	楡原層		AL1
	月長石流紋岩		
	安山岩類		高来山安山岩
中生代	太美山層群		Ra
	濃飛流紋岩		
	大造谷層		
	手取層群	明谷層 赤岩層 桑島層 五味島層	
	ジュラ紀	船津花崗岩類	
古生代 原生代	飛騨変成岩類		

・船野(1993)によれば、敷地周辺の花崗岩類は約1.9~1.4億年前、楡原層は約2500万年前、別所岳安山岩類は約1600万年前に形成された。
 ・なお、敷地内の別所岳安山岩類を対象にK-Ar年代分析を実施した結果、K-Ar年代値は22~15Maを示した(第1121回審査会合 机上配布資料2 P.5.3-1-6)。

地質系統対比表(船野(1993)を編集, 一部加筆)

地質, 弾性波速度及び密度の調査結果 - 花崗岩上面の形状の考察(3/3) -



この図は、国土地理院発行の2万5千分の1地形図(下唐川)を使用したものである。

凡 例

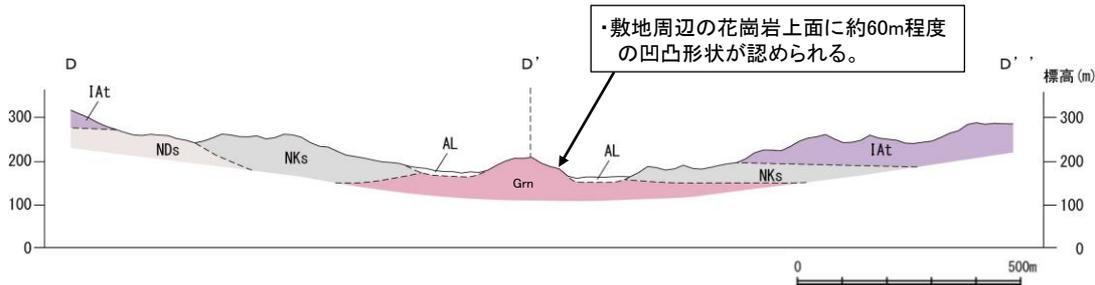
【地質】		地 層・岩 石 名
第四紀	沖積層	AL
中新世	別所岳安山岩類	IAa 安山岩
第三紀	別所岳安山岩類	IAAt 安山岩質火砕岩(凝灰角礫岩)
古第三紀	デイサイト・溶結凝灰岩	Nkd
	大角間層	NKs
	大福寺砂岩層	NDs
先第三紀	花崗岩・片麻岩	Grn

【記号】

- 移動土塊
- 20° 43' 地層の走向・傾斜
- 20° 43' 節理の走向・傾斜
- A A' 地質断面線

【リニアメント・変動地形】

- L (変動地形である可能性は非常に低い)
- ケバは低下側を示す。

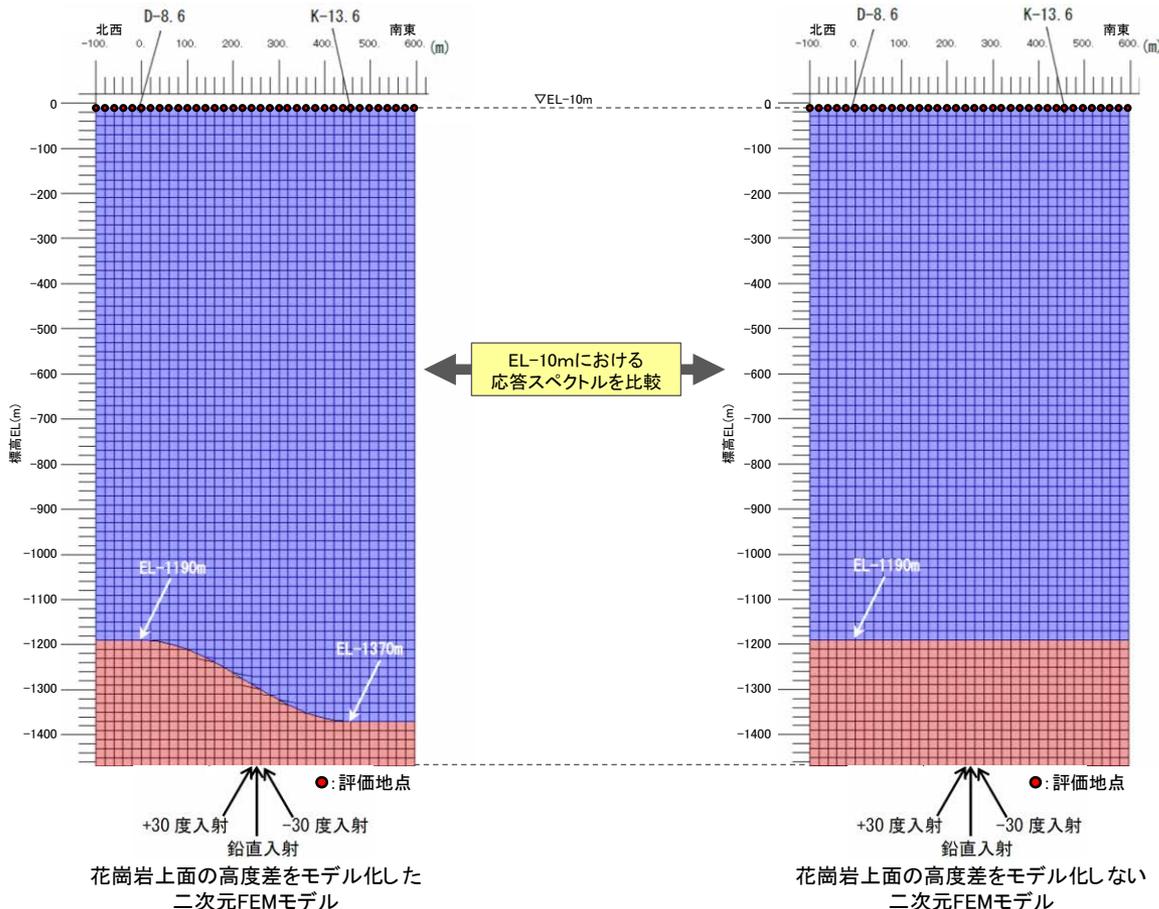


地質断面図

富来川断層北端付近の地質図

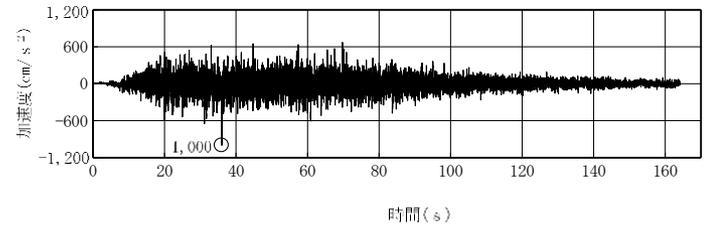
花崗岩上面の形状の影響検討 - 検討方法 -

- K-13.6孔とD-8.6孔において花崗岩上面の高度差約180mが認められることから、二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討を実施するとともに、1.3節の観測記録を用いた検討の結果も踏まえ、花崗岩上面の高度差が地震動へ与える影響を検討した。
- 地震動シミュレーションによる検討は、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデル※と花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデル※にそれぞれ地震波を入力し、第3速度層が概ね水平に広がっているEL-10mにおける応答スペクトルを比較することで行った。二次元FEMモデルは、K-13.6孔とD-8.6孔を通る断面を対象とし、花崗岩上面の高度差は、P.92~94の考察を踏まえ、K-13.6孔とD-8.6孔の花崗岩上面を滑らかに接続するようにモデル化し、安山岩・凝灰角礫岩層と花崗岩層の2層構造とした。
- 広帯域で花崗岩上面の高度差の影響を確認するため、検討に用いる地震波は申請時の基準地震動Ss-1とした。また地震波の入射方向については敷地近傍の福浦断層等の断層面の位置を考慮し、鉛直入射及び斜め入射(±30°)した場合の検討を行った。検討のイメージと速度層の地盤物性を下記に示す。



速度層の地盤物性

層区分	Vs (km/s)	Vp (km/s)	密度 (t/m ³)
安山岩・凝灰角礫岩層	2.14	3.92	2.34
花崗岩層	3.16	5.29	2.67

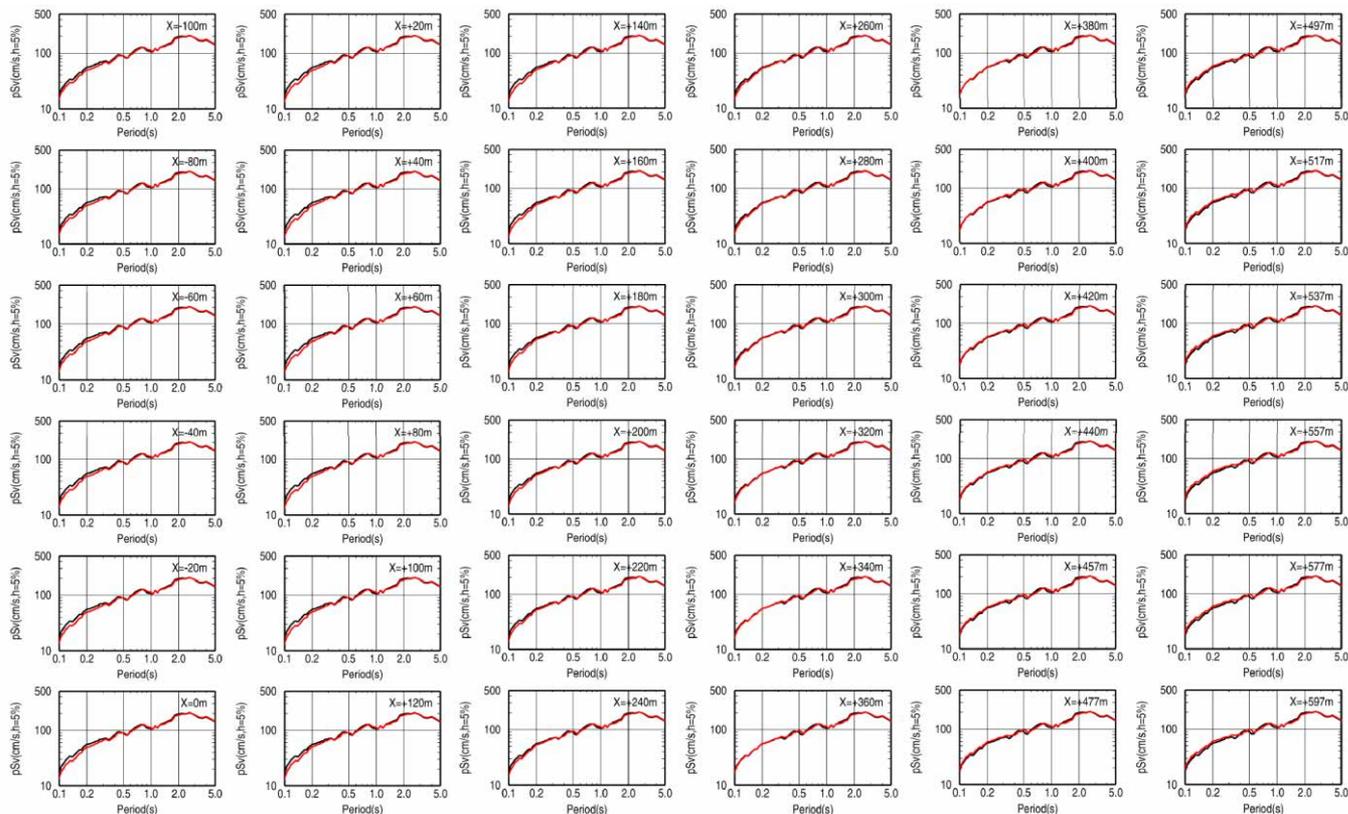
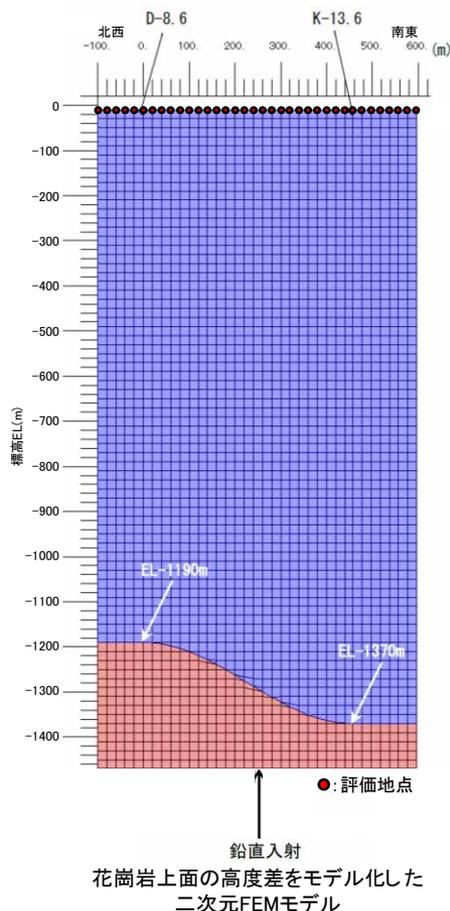


検討に用いる地震波(申請時の基準地震動Ss-1)

※ 二次元FEMモデルの側面及び底面への波動の逸散を考慮するため、側面はエネルギー伝達境界を設定し、側面境界以遠は、水平成層地盤として仮定する。また、底面は粘性境界を設定し、EL-1,500m以深の底面物性は花崗岩層の値を用いる。

○ 花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルと花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルに鉛直入射した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果、いずれの周期についても顕著な違いはみられない。

— : 花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデル
 — : 花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデル

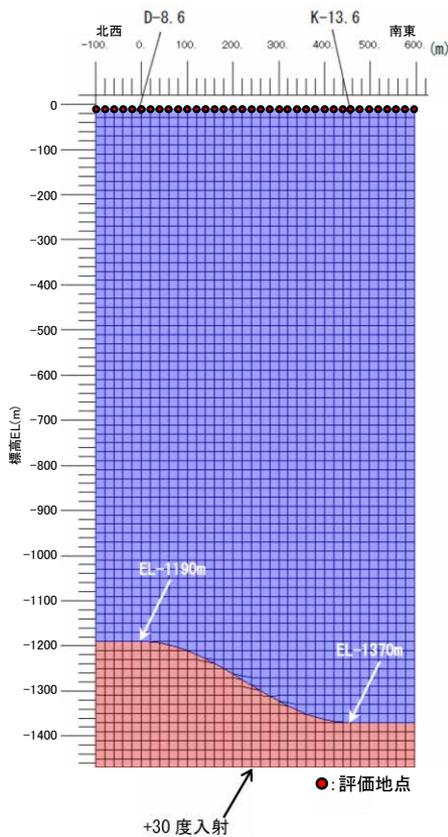


各評価地点の応答スペクトル

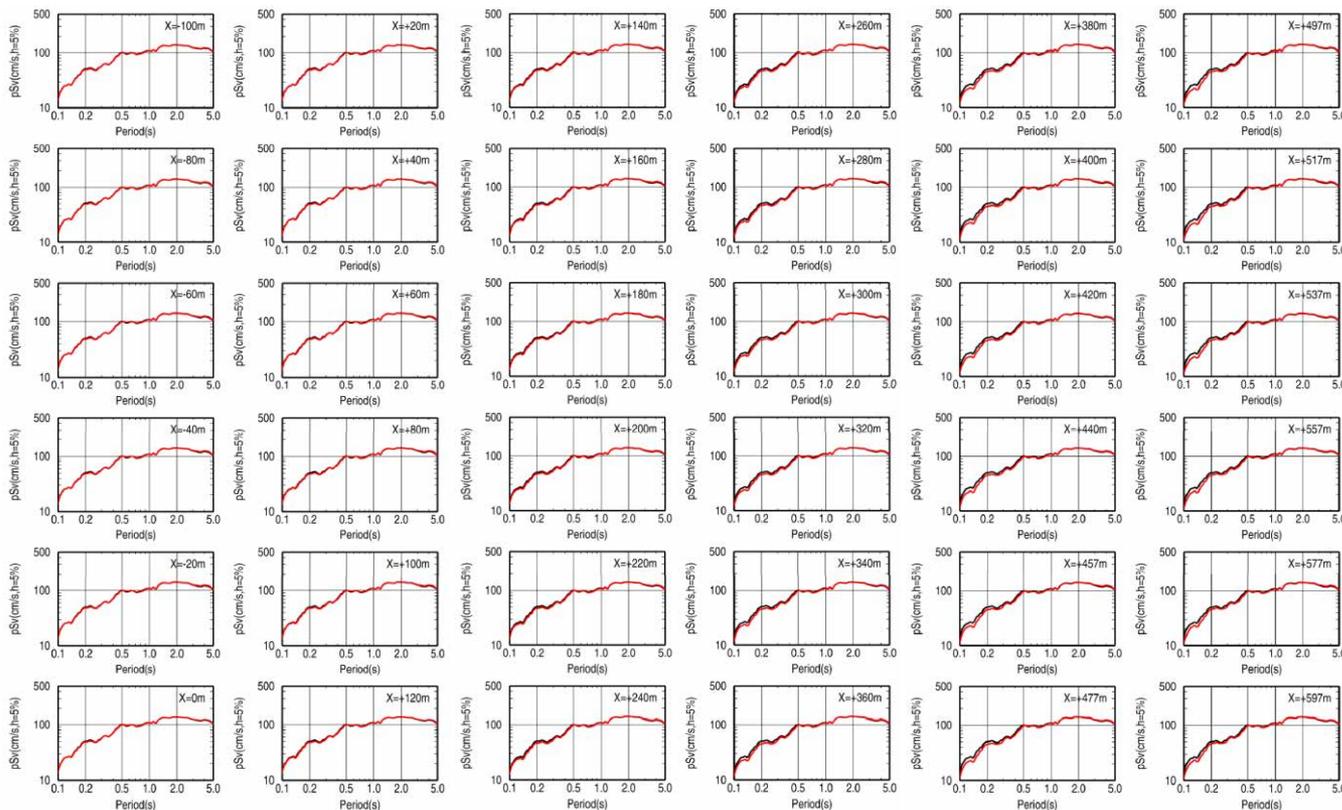
※ モデル図は便宜上、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

○ 花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルと花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルに斜め入射(+30°)した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果、鉛直入射の場合と同様、いずれの周期についても顕著な違いはみられない。

— : 花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデル
 — : 花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデル



花崗岩上面の高度差をモデル化した
 二次元FEMモデル

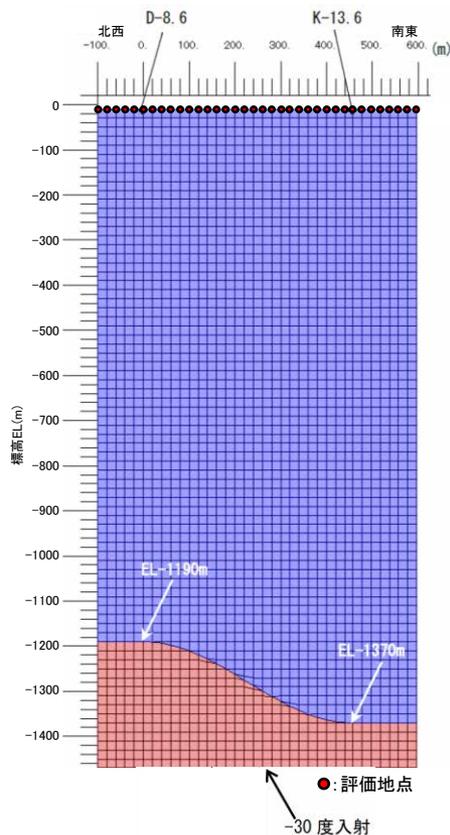


各評価地点の応答スペクトル

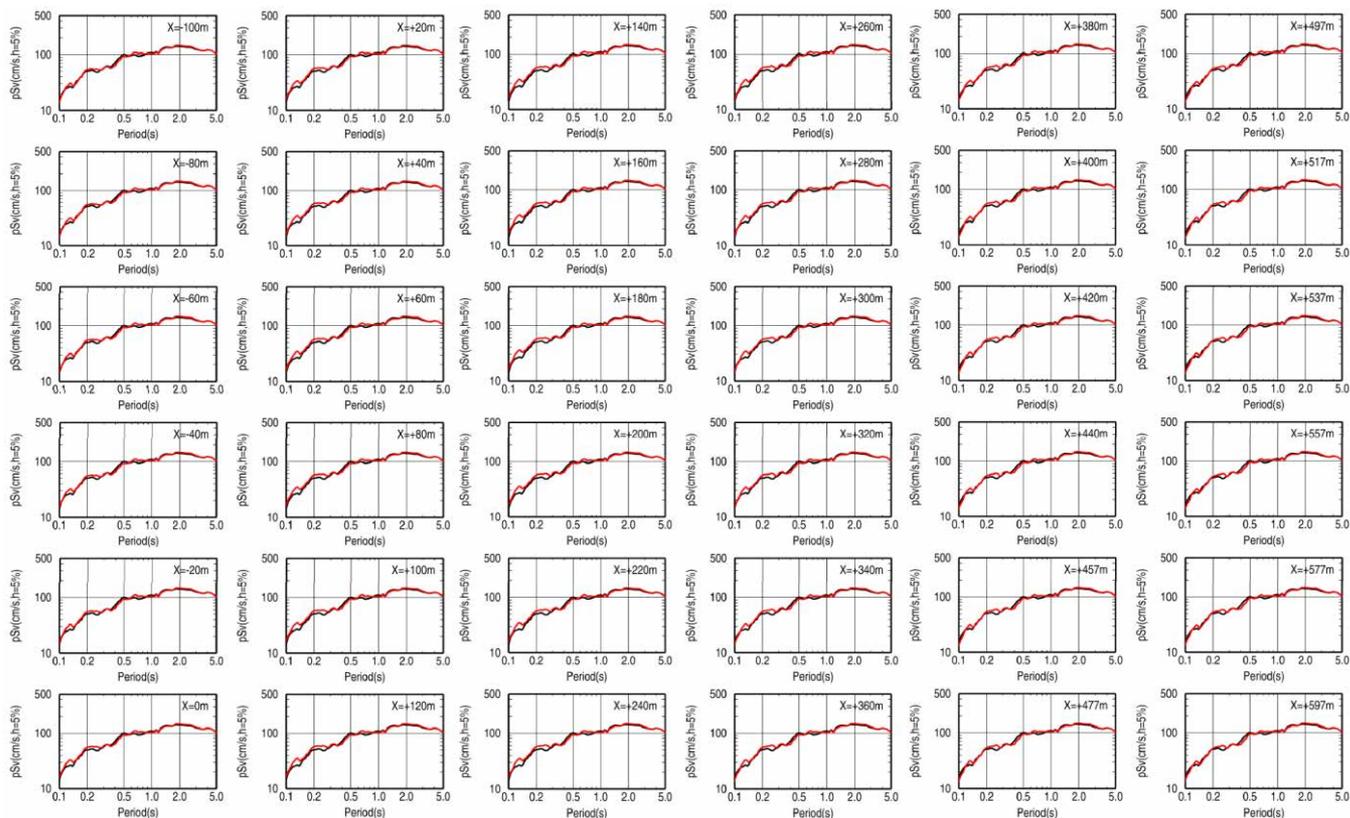
※ モデル図は便宜上、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

○ 花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルと花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルに斜め入射(-30°)した場合のEL-10mにおける各評価地点の応答スペクトルを比較した結果、鉛直入射の場合と同様、いずれの周期についても顕著な違いはみられない。

— : 花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデル
 — : 花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデル



花崗岩上面の高度差をモデル化した
 二次元FEMモデル

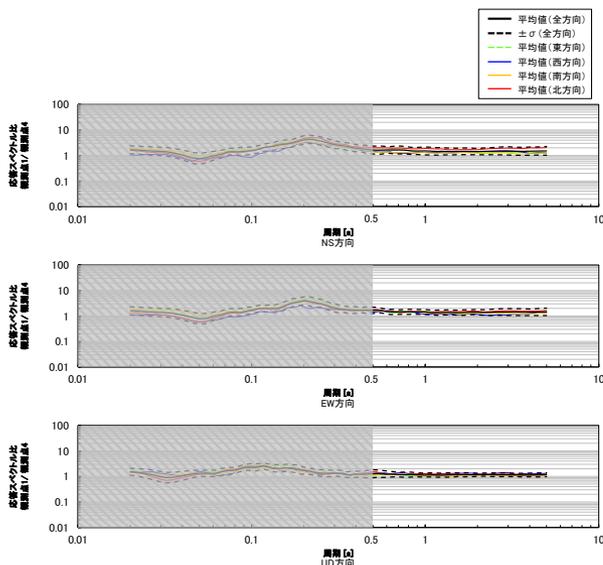


各評価地点の応答スペクトル

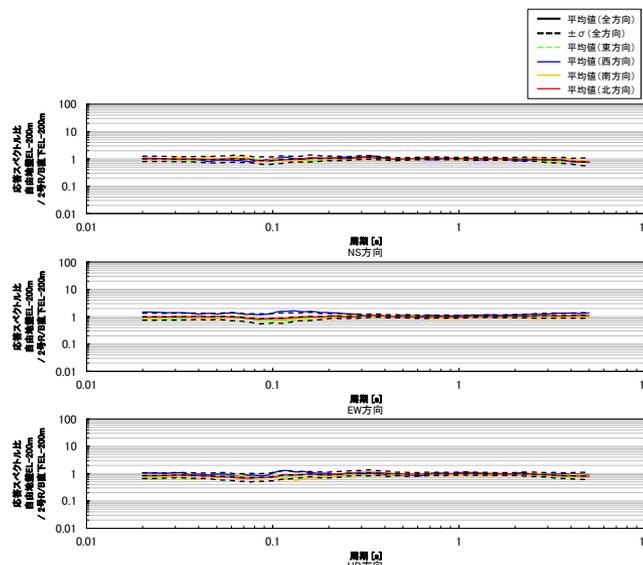
※ モデル図は便宜上、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルを示している。

➤ 二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果によれば、各評価地点の応答スペクトルに顕著な違いはみられない。

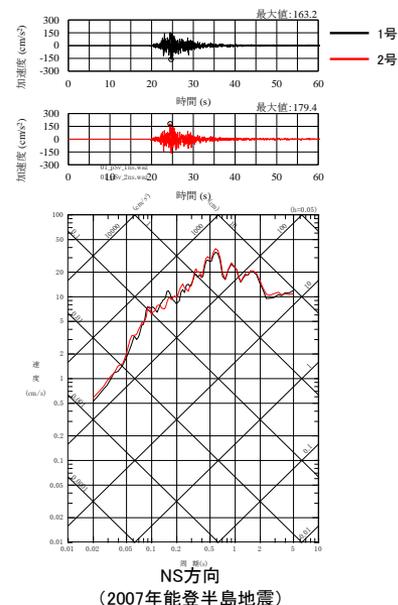
- 花崗岩上面の高度差が地震動へ与える影響を検討するため、1.3節において実施した観測記録を用いた検討結果を確認した。
- 敷地の地震基盤以浅を対象とした水平アレー地震観測記録(地表)(到来方向別)を用いた検討結果(1.3.3項(P.162))によれば、観測点4に対する観測点1~3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1~4周辺の地震基盤以浅(表層地盤を除く)に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。
- 敷地の地震基盤~EL-200mを対象とした水平アレー地震観測記録(地中)(到来方向別)を用いた検討結果(1.3.4項(P.166))によれば、2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、2号原子炉建屋直下地震観測点周辺と自由地盤地震観測点周辺のEL-200m~地震基盤に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。
- 敷地の地震基盤以浅を対象とした原子炉建屋基礎版上の地震観測記録を用いた検討結果(1.3.5項(P.176))によれば、加速度時刻歴波形及び応答スペクトルに顕著な違いはないことから、1号原子炉建屋周辺及び2号原子炉建屋周辺の地震基盤以浅に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。



応答スペクトル比(観測点1/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較(1.3.3項)



応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋直下EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較(1.3.4項)



1号及び2号原子炉建屋基礎版上における加速度時刻歴波形及び応答スペクトルの比較(1.3.5項)

➤ 観測記録を用いた検討(1.3.3項~1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果

- 二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果によれば、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルと花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルの応答に顕著な違いはみられない。

1.3節において実施した観測記録を用いた検討結果

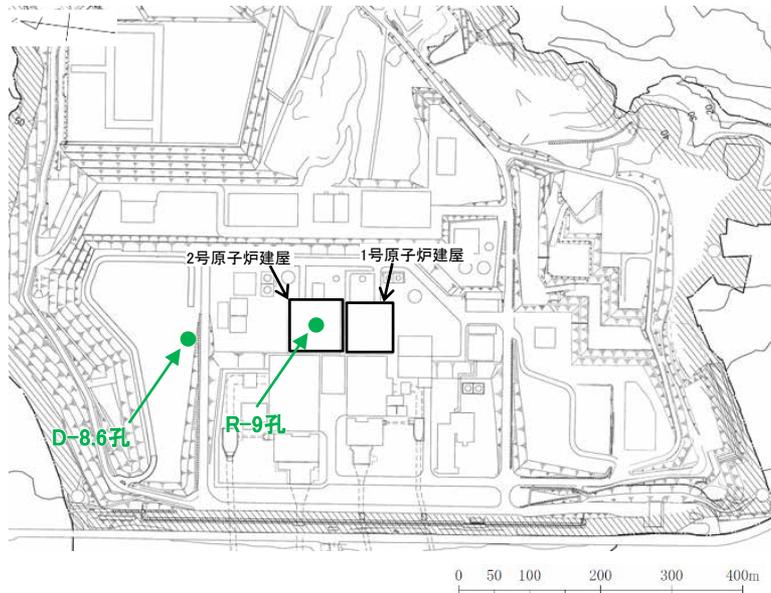
- 観測記録を用いた検討(1.3.3項～1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

- 
- 二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討結果(花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデルと花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルの応答に顕著な違いはみられないこと)及び1.3節において実施した観測記録を用いた検討結果(敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられること)より、敷地の花崗岩上面の高度差は、地震動へ与える影響は小さいものと考えられる。

1.1.6 原子炉設置位置付近の減衰構造(地震基盤以浅)

調査結果(R-9孔及びD-8.6孔)

- 原子炉設置位置付近の減衰特性を把握するため、下図に示す2孔で実施したQ値測定結果を確認した。
- 最大振幅法によるQ値の測定結果を下表に示す。



調査位置図

最大振幅法によるQ値測定結果

調査位置	層区分	標高EL (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値
R-9孔	1 (第3速度層)	1 ~ -97	24	10.4
	2 (第4速度層)	-97 ~ -301	25	8.9
D-8.6孔	1 (第3速度層)	-4 ~ -110	32	8.1
	2 (第4速度層)	-110 ~ -160	26	7.6
	3	-160 ~ -990	27	27.4
	4	-990 ~ -1190	22	47.0

- Q値測定結果によれば、原子炉設置位置付近のQ値は、比較的浅部(R-9孔のEL-301m以浅及びD-8.6孔のEL-160m以浅)については10程度、また、それより深部については、深さ方向に大きくなる傾向がみられる。

解放基盤表面の設定 (1/4)

○ 敷地の解放基盤表面は、解釈別記2の記載事項及び敷地地盤の特徴を踏まえて設定する。

■ 解放基盤表面の設定に係る解釈別記2の記載事項

著しい高低差がなく、ほぼ水平で相当な拡がりを持って想定される自由表面であり、せん断波速度がおおむね700m/s以上の硬質地盤であって、著しい風化を受けていない位置に設定すること

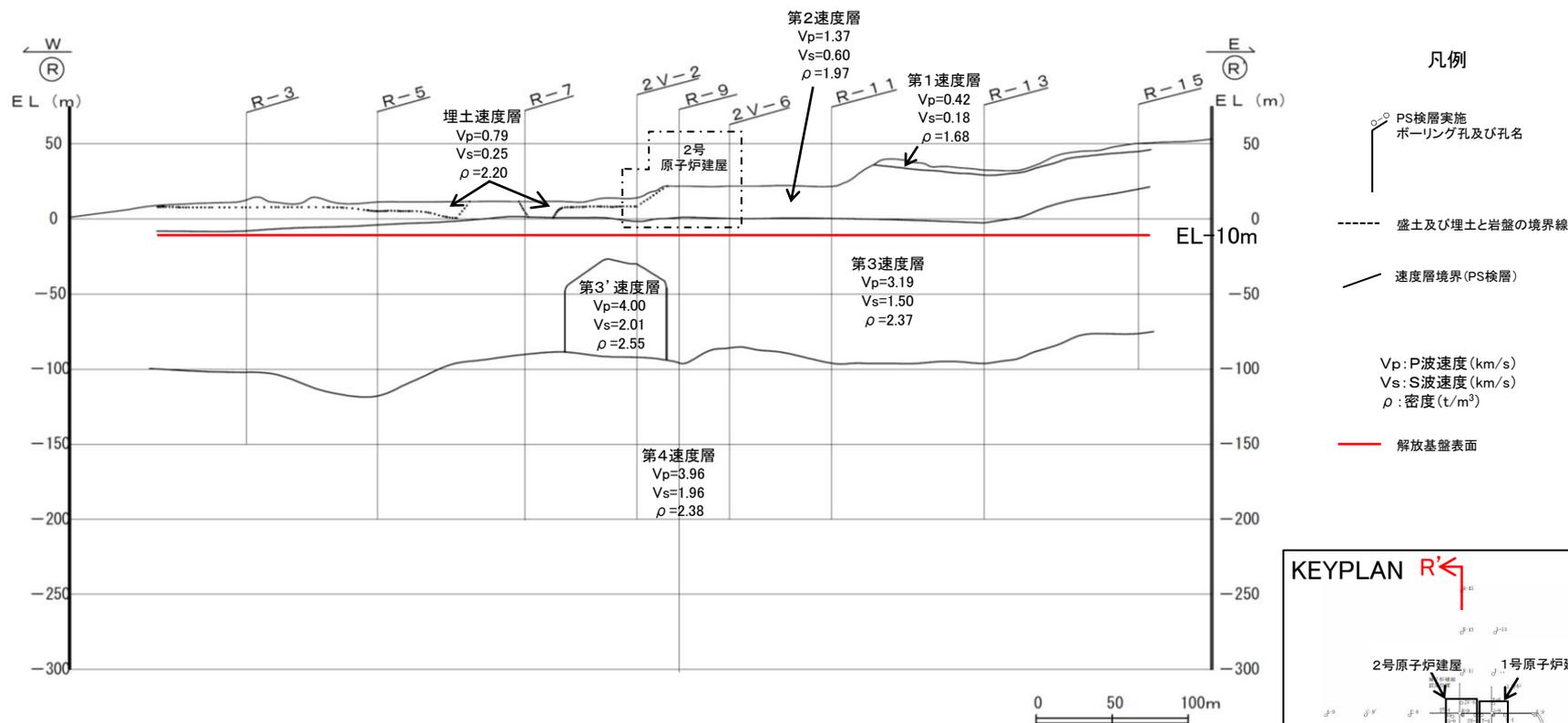
■ 敷地地盤の特徴

- 敷地の地質・地質構造は、安山岩(均質)、安山岩(角礫質)及び凝灰角礫岩からなる新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類が広く分布し、ほぼ水平な構造と判断される。(詳細は1.1.3項(P.57～68)参照)
- 敷地のEL-200m以浅の速度構造は、第1速度層から第4速度層に分類され、概ね水平な層構造を呈す。また第3速度層以深は、S波速度が1.5km/s以上の硬質地盤であり、第3速度層上面はEL-10m以浅に位置する。(詳細は1.1.4項(P.70～88)参照)
- 原子炉設置位置(EL-4.7m)の岩盤にはほとんど変質部は認められず、主に (Ba) 級、(Bb) 級の岩級区分を示す安山岩が広く分布していることから、著しい風化を受けていないと判断される。(詳細は1.1.3項(P.69)参照)



- 敷地地盤は、安山岩を主体とした別所岳安山岩類が広く分布し、ほぼ水平で相当な拡がりをもっており、S波速度が1.5km/sである第3速度層において著しい風化を受けていないと判断されるEL-10mの位置を解放基盤表面として設定する。(設定した解放基盤表面の位置はP.103～105の速度構造及び密度構造断面参照)

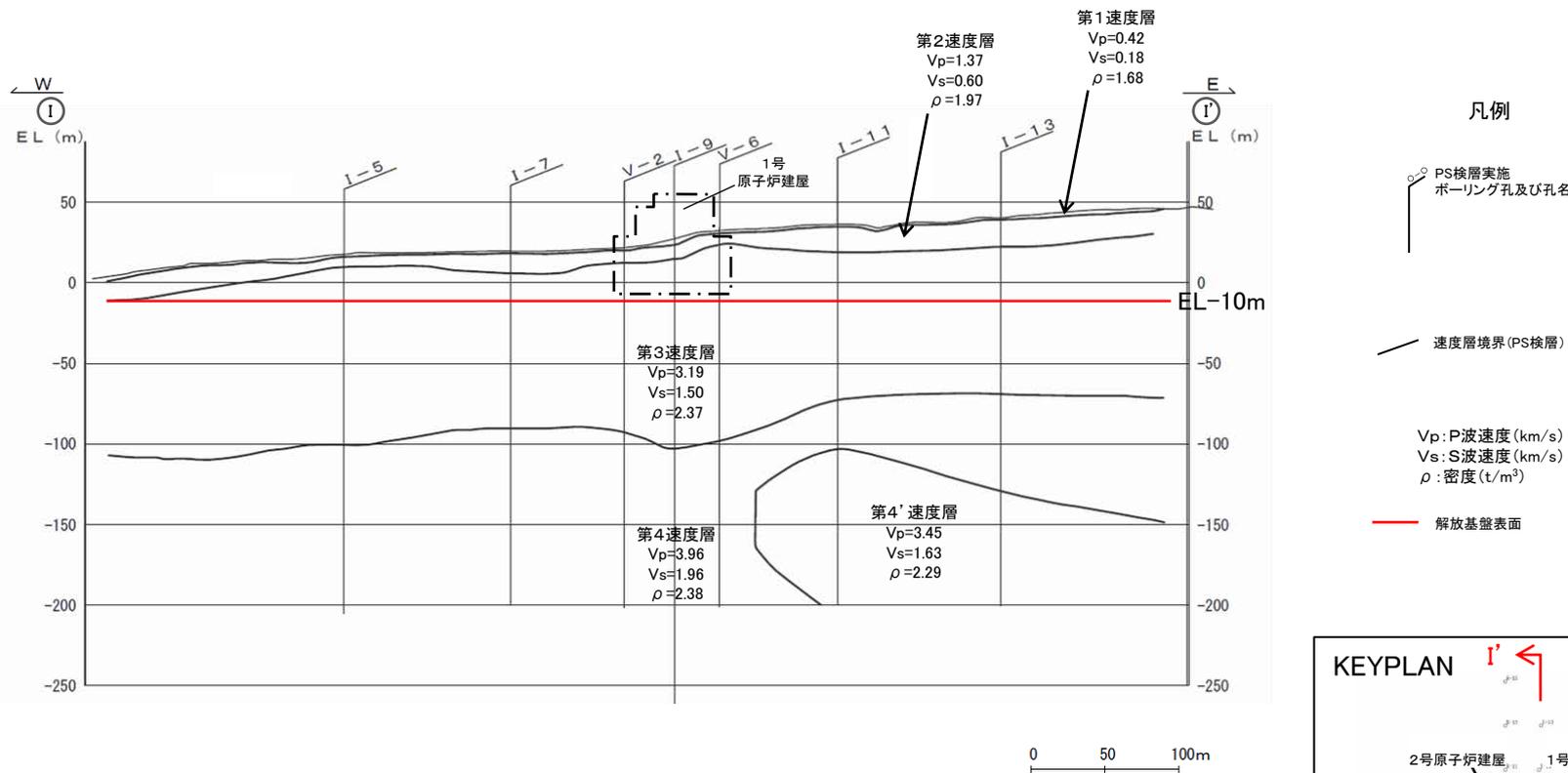
○ EL-200m以浅の速度構造及び密度構造断面(R-R'断面)に設定した解放基盤表面の位置(EL-10m)を示す。



速度構造及び密度構造断面(R-R'断面)※

※ 速度構造及び密度構造断面の設定の詳細はP.71参照。

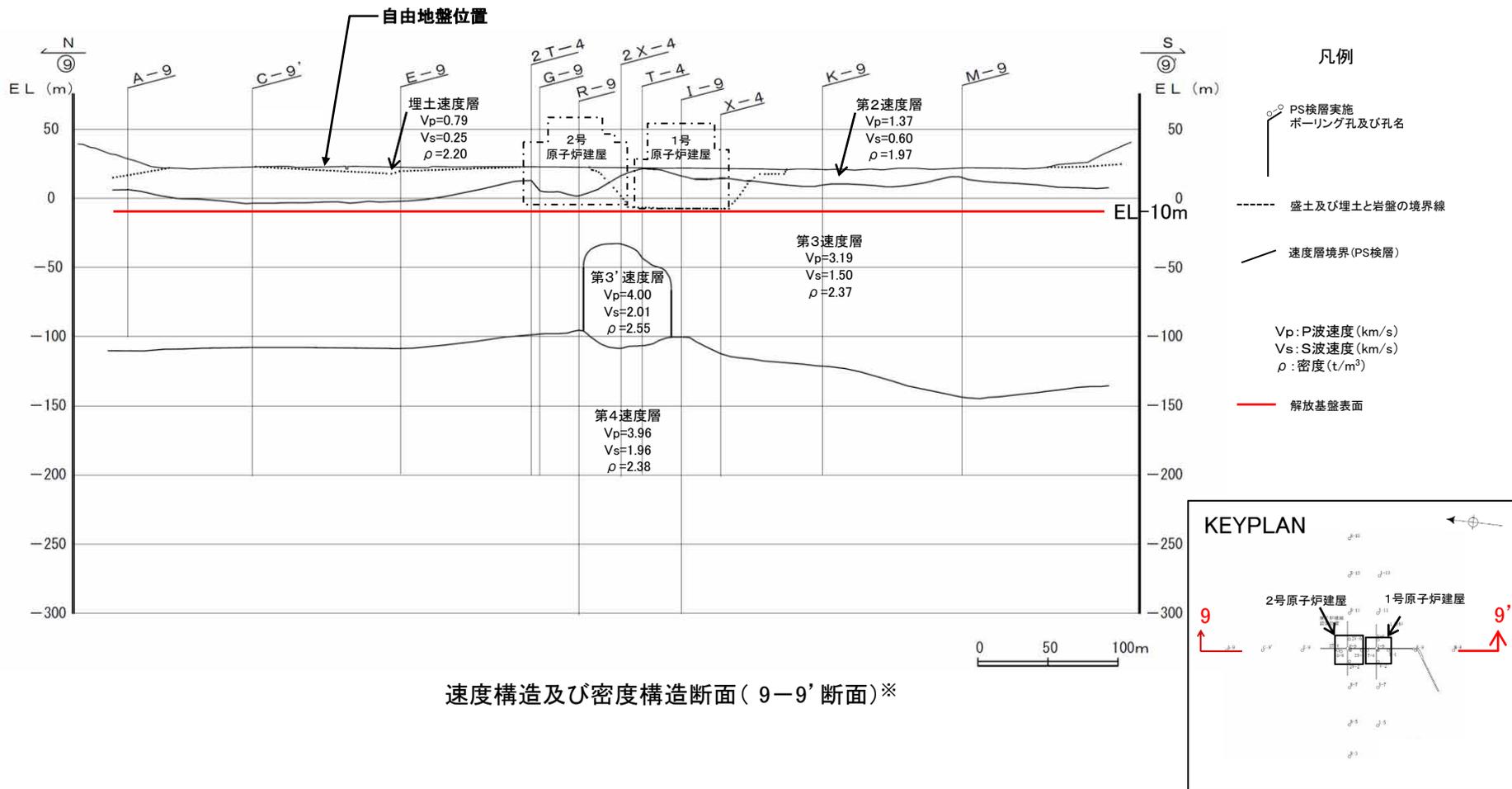
○ EL-200m以浅の速度構造及び密度構造断面(I-I'断面)に設定した解放基盤表面の位置(EL-10m)を示す。



速度構造及び密度構造断面 (I-I'断面)※

※ 速度構造及び密度構造断面の設定の詳細はP.72参照。

○ EL-200m以浅の速度構造及び密度構造断面(9-9'断面)に設定した解放基盤表面の位置(EL-10m)を示す。



※ 速度構造及び密度構造断面の設定の詳細はP.73参照。

まとめ

- 地震基盤以浅の地下構造の成層性及び均質性を評価するため、「敷地及び敷地周辺における地層の傾斜、断層及び褶曲構造等の地質構造」、「岩相・岩質の不均一性」並びに「敷地の地震基盤以浅の速度構造、減衰特性」に関する地質・地質構造の調査による検討を実施した(1.1.1項～1.1.6項)。検討結果を下記に示す。
- また、これらの検討結果を踏まえ、敷地の解放基盤表面を設定した(1.1.7項)。

1.1.1 敷地周辺の地質・地質構造 一敷地を中心とした半径30km範囲一

- 敷地周辺の地層の傾斜、断層及び褶曲構造等の地質構造、並びに岩相・岩質の不均一性を把握するため、地表地質調査等の地質調査結果から地質・地質構造を確認した。
- 敷地周辺陸域の地質は、新第三紀以降の地層が基盤である花崗岩類を直接覆っている。
- 敷地を含む邑知潟平野北側では、大きな褶曲構造は認められない。
- 敷地周辺海域の地質は、北部海域は、笹波沿岸及び前ノ瀬・長平礁周辺の顕著なD層の隆起で特徴づけられる。南部海域は、南西方向に広がる堆積盆地と、厚く堆積するC層及びB層で特徴づけられる。

1.1.2 敷地近傍の地質・地質構造 一敷地を中心とした半径5km範囲一

- 敷地近傍の地層の傾斜、断層及び褶曲構造等の地質構造、並びに岩相・岩質の不均一性を把握するため、地表地質調査等の地質調査結果から地質・地質構造を確認した。
- 海岸に沿って広く分布する新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類は、敷地北方で緩く東に傾斜する凝灰岩を挟む。
- 敷地近傍に分布する新第三紀の地層の傾斜は、概ね水平ないし10°程度を示している。
- 中位段丘堆積層は、ほぼ水平または海側方向に非常に緩く傾斜して分布する。
- 海岸に露出する新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類は海域のD₂層に対比され、D₂層は沖合い方向に徐々に深度を増す。その上部には水深20m以浅の汀線部を除き、C層、B層、A層が分布し、A層及びB層は海底面とほぼ平行して堆積している。

1.1.3 敷地の地質・地質構造

- 敷地の地層の傾斜、断層及び褶曲構造等の地質構造、並びに岩相・岩質の不均一性を把握するため、ボーリング調査等の地盤調査結果から地質・地質構造を確認した。
- 敷地の地質は、新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類と、これを覆う第四紀の堆積物からなる。
- 別所岳安山岩類は、敷地に広く分布しており、安山岩を主体とし、凝灰角礫岩を挟在する。
- 原子炉設置位置付近の地質は、別所岳安山岩類の安山岩(均質)、安山岩(角礫質)及び凝灰角礫岩からなる。
- 2号原子炉建屋底盤の岩盤にはほとんど変質部は認められず、主に(Ba)級、(Bb)級の岩級区分を示す安山岩が広く分布している。

1.1.4 原子炉設置位置付近の速度構造等(EL-200m以浅)

- 原子炉設置位置付近のEL-200m以浅の速度構造を把握するため、26孔の浅層ボーリングで実施したPS検層結果を確認した。
- 原子炉設置位置付近のEL-200m以浅の速度構造は、概ね水平な層構造を呈すものの、周囲と異なる速度特性を示す範囲として、第3'速度層及び第4'速度層が認められる。
- 微動H/Vスペクトル比を用いた逆解析の検討結果、原子炉設置位置周辺の第3速度層上面はEL-10m以浅に位置しており、顕著な不整形はみられない。
- 周囲と異なる速度特性を示す範囲として第3'速度層及び第4'速度層が認められることから、二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討を実施して、第3'速度層及び第4'速度層が地震動へ与える影響を確認した結果、第3'速度層または第4'速度層をモデル化した二次元FEMモデル及び第3'速度層または第4'速度層をモデル化しない二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる応答に顕著な違いはみられない。また、観測記録を用いた検討(1.3.2項～1.3.3項、1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられることより、第3'速度層及び第4'速度層は、地震動へ与える影響は小さいものと考えられる。

まとめ

1.1.5 原子炉設置位置付近の速度構造等(地震基盤以浅)

- 原子炉設置位置付近の地震基盤以浅の地質、速度構造を把握するため、2孔で実施した大深度ボーリング調査結果を確認した。
- 原子炉設置位置付近の地震基盤以浅の地質は、下位から先第三紀の花崗岩、古第三紀の楡原階(砂岩と頁岩の互層、礫岩)、新第三紀の岩稻階(安山岩、凝灰角礫岩)からなり、花崗岩以浅におけるP波速度及びS波速度はそれぞれ4km/s及び2km/s程度、花崗岩以深におけるP波速度及びS波速度はそれぞれ5km/s及び3km/s程度であり、密度は概ね2~3t/m³の範囲を示す。
- 大深度ボーリング2孔(D-8.6孔、K-13.6孔)の花崗岩上面に約180mの高度差が認められることから、二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討を実施して、花崗岩上面の高度差が地震動へ与える影響を確認した結果、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデル及び花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる応答に顕著な違いはみられない。また、観測記録を用いた検討(1.3.3項~1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられることより、敷地の花崗岩上面の高度差は、地震動へ与える影響は小さいものと考えられる。

1.1.6 原子炉設置位置付近の減衰構造(地震基盤以浅)

- 原子炉設置位置付近の減衰特性を把握するため、2孔で実施したQ値測定結果を確認した。
- 原子炉設置位置付近のQ値は、比較的浅部(R-9孔のEL-301m以浅及びD-8.6孔のEL-160m以浅)については10程度、また、それより深部については、深さ方向に大きくなる傾向がみられる。

1.1.7 解放基盤表面の設定

- 敷地の解放基盤表面は、解釈別記2の記載事項及び敷地地盤の特徴を踏まえ、S波速度が1.5km/sである第3速度層において著しい風化を受けていないと判断されるEL-10mの位置に設定した。

- 地質・地質構造の調査による地下構造の検討の結果、敷地周辺の地質は、新第三紀以降の地層が基盤である花崗岩類を直接覆っており、敷地を含む邑知潟平野北側では、大きな褶曲構造は認められない。また、敷地の地震基盤以浅の地質は凝灰角礫岩を狭在するものの安山岩を主体とした新第三紀の岩稻階の別所岳安山岩類が広く分布しており、速度構造は概ね水平な層構造を呈していること、局所的に周囲と異なる速度特性を示す第3'速度層及び第4'速度層並びに大深度ボーリング2孔間で認められた花崗岩上面の高度差が解放基盤表面の地震動へ与える影響が小さいことから、敷地の地震基盤以浅の地下構造は成層かつ均質と評価できることを確認した。
- また、敷地の解放基盤表面は、S波速度が1.5km/sである第3速度層において著しい風化を受けていないと判断されるEL-10mの位置に設定した。

1.2 物理探査による地下構造の検討

- 地震基盤の位置及び形状、地震基盤より深部の地下構造の成層性及び均質性を評価するため、「地震基盤の位置及び形状」、「地震基盤より深部の速度構造」に関する物理探査による検討を実施する(1.2.1項～1.2.7項)。
- また、これらの検討結果を踏まえ、敷地の地震基盤を設定する(1.2.8項)。

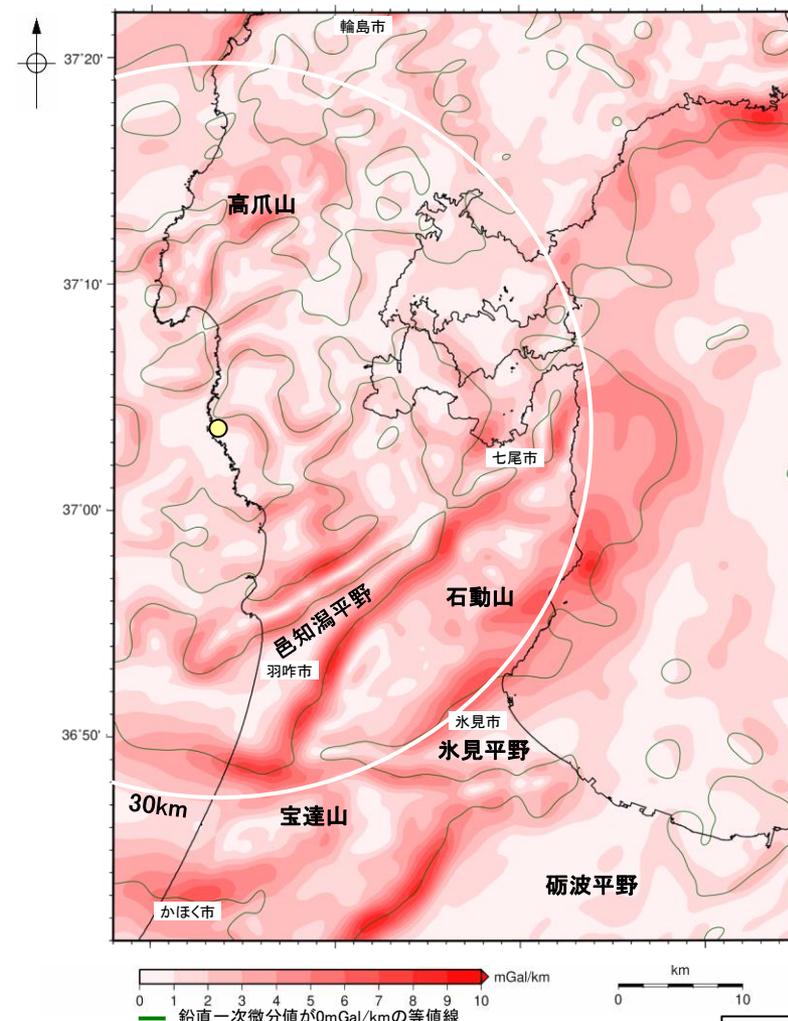
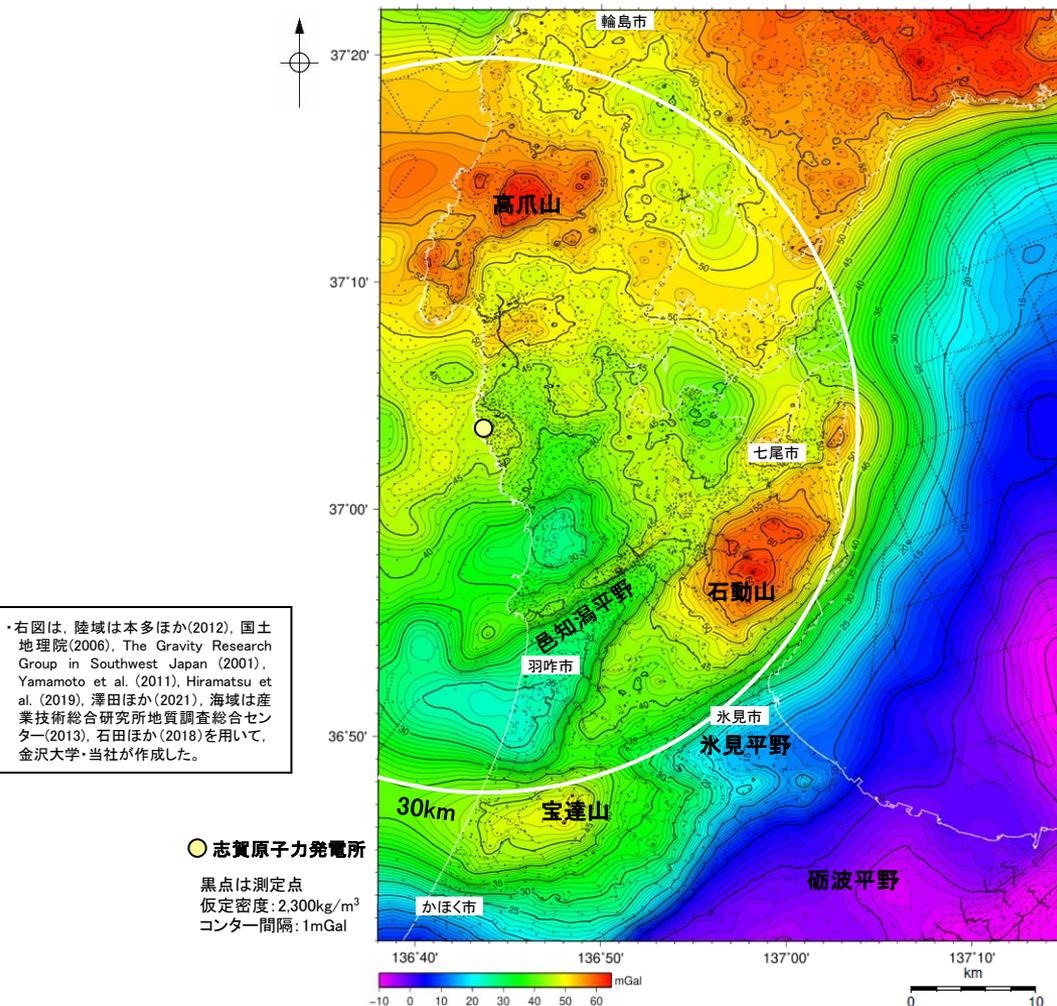
□ : 物理探査による地下構造の検討

調査項目	調査方法	調査の目的	対象		手法※		地震動評価の3要素	詳細説明
			水平方向	深さ方向	種別	内容		
1.2.1 重力探査	敷地周辺の地震基盤の形状を把握するため、敷地周辺のブーゲー異常図及び水平一次微分図を確認する。	③地震基盤の位置及び形状の把握	敷地周辺	地震基盤	㊸重力探査	ブーゲー異常を確認する。	サイト特性	P.110～111
1.2.2 地震波トモグラフィー	敷地周辺の地震基盤より深部(深さ5km程度以深)の速度構造を把握するため、地震波トモグラフィーに基づくP波速度構造及びS波速度構造を確認する。	④地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地周辺	地震基盤より深部	㊹文献調査	地震波トモグラフィーに基づくP波速度構造・S波速度構造を確認する。	伝播経路特性	P.112～113
1.2.3 屈折法地震探査	敷地周辺の地震基盤の位置及び形状、並びに地震基盤より深部の速度構造を把握するため、文献及び当社による屈折法地震探査に基づくP波速度構造を確認する。	③地震基盤の位置及び形状並びに ④地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地周辺	地震基盤	㊺屈折法地震探査	P波速度構造を確認する。	サイト特性	P.114、 P.117
				地震基盤より深部	㊹文献調査	屈折法地震探査に基づくP波速度構造を確認する。	伝播経路特性	P.114～116
1.2.4 微動アレー探査	敷地近傍の地震基盤の位置及び形状を把握するため、微動アレー探査に基づくS波速度構造を確認し、地震基盤に相当する層の上面の深さを複数の地点で比較する。	③地震基盤の位置及び形状並びに ④地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地近傍	地震基盤	①微動アレー探査	S波速度構造を確認する。	サイト特性	P.118～119
1.2.5 反射法地震探査・VSP探査	敷地の地震基盤の位置及び形状を把握するため、大深度ボーリング孔を用いたVSP探査及び海陸連続で測線を配置した反射法地震探査に基づく反射断面を確認する。	③地震基盤の位置及び形状の把握	敷地	地震基盤	①反射法地震探査・VSP探査	反射断面を確認する。	サイト特性	P.120～123
1.2.6 広域微動探査	敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を把握するため、地下の速度構造が反映されている広域微動観測記録に基づき複数の観測点ペアで評価した群速度を比較する。	④地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地周辺	地震基盤より深部	㊻広域微動探査	地下の速度構造が反映されている広域微動観測記録に基づき複数の観測点ペアで評価した群速度を比較する。	伝播経路特性	P.124～127
1.2.7 単点微動探査	敷地の地震基盤の形状を把握するため、地下の速度構造が反映されている微動H/Vスペクトル比を敷地の複数の観測点で比較する。また、水平アレー地震観測記録を用いた検討結果との整合性を確認する。	③地震基盤の位置及び形状の把握	敷地	地震基盤	㊼単点微動探査	地下の速度構造が反映されている微動H/Vスペクトル比を敷地の複数の観測点で比較する。	サイト特性	P.128～133

※ 青字の調査内容は、地質・地質構造の審査において説明済みの内容

(1) 敷地周辺の重力異常(ブーゲー異常図)

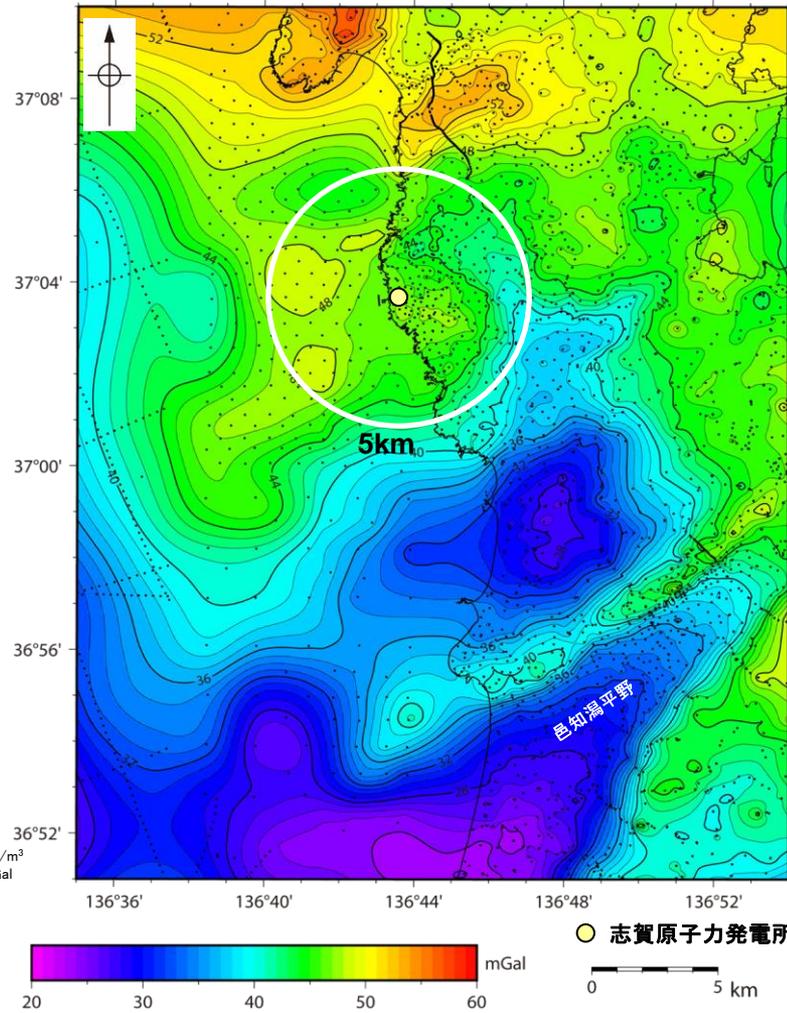
- 能登半島では地震基盤である花崗岩を新第三紀以降の地層が直接覆っており(P.51~52), これらの密度差により, 重力異常値は地震基盤の形状を反映していると考えられることから, 敷地周辺の地震基盤の形状を把握するため, 敷地周辺のブーゲー異常図及び水平一次微分図を確認した。
- 敷地周辺陸域については, 稠密な調査を実施し, 重力異常図を作成した。周辺に対して高い重力異常を示すのは, 高爪山周辺, 石動山周辺及び宝達山周辺, 低い重力異常を示すのは, 輪島市南部, 羽咋市北部及び邑知潟平野南西部である。
- 規模が大きく直線的に連続する重力異常急変部は, NE-SW方向を示す邑知潟平野の北西縁及び南東縁, 石動山と氷見平野との境界及び宝達山地と砺波平野との境界と, E-W方向を示す宝達山北部及び南部に認められる。
- ブーゲー異常図及び水平一次微分図から, 敷地の位置する能登半島中部には規模が大きく直線的に連続する重力異常急変部は認められない。



1.2.1 重力探査

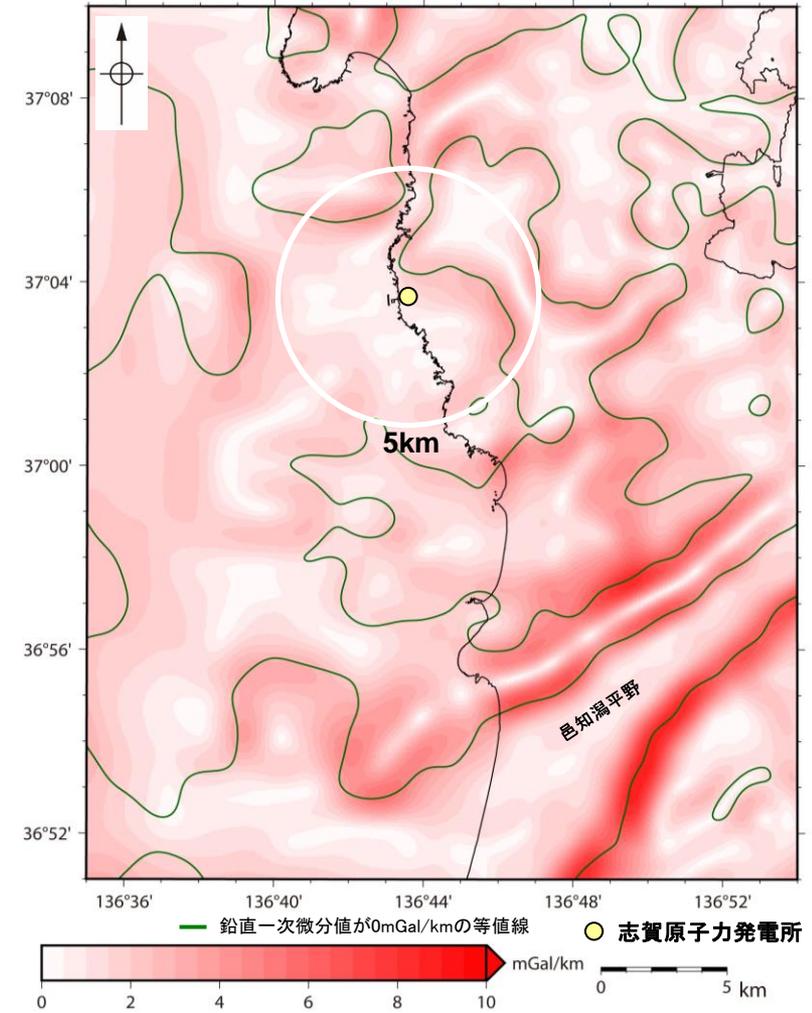
(2) 敷地近傍の重力異常(ブーゲー異常図)

○敷地近傍(敷地から半径5km範囲)の重力異常値はほぼ一定であり、高重力異常域と低重力異常域との境界は明瞭ではなく、敷地近傍には地震基盤の形状の急激な変化を示唆する顕著な線状の重力異常急変部は認められない。



・右図は、陸域は本多ほか(2012)、国土地理院(2006)、The Gravity Research Group in Southwest Japan (2001)、Yamamoto et al. (2011)、Hiramatsu et al. (2019)、澤田ほか(2021)、海域は産業技術総合研究所地質調査総合センター(2013)、石田ほか(2018)を用いて、金沢大学・当社が作成した。

敷地近傍のブーゲー異常図(金沢大学・当社作成)



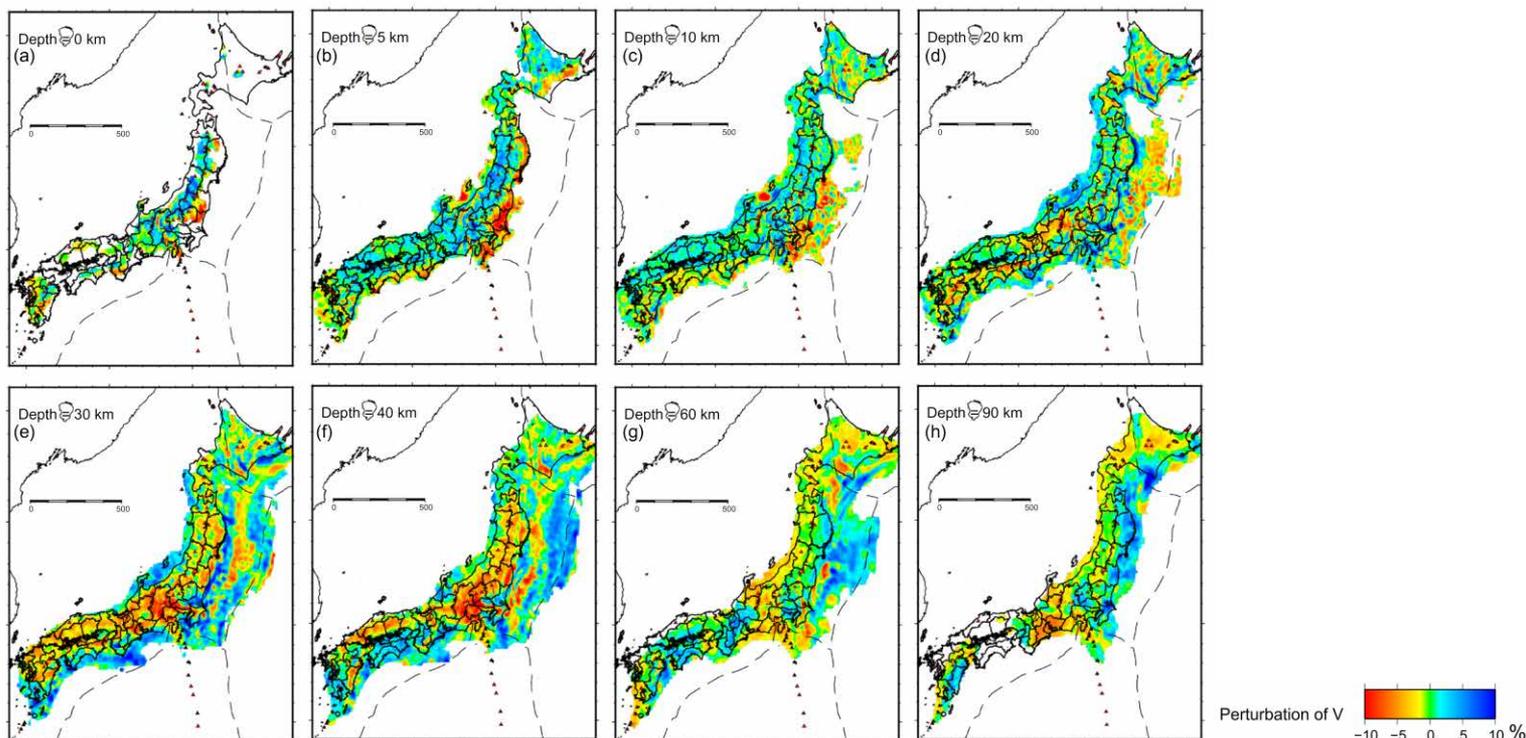
敷地近傍の水平一次微分図(金沢大学・当社作成)

・水平一次微分図は、作図範囲の大きさ、調査密度を考慮し、平面トレンドを除去及び遮断波長3kmのローパスフィルター処理後のブーゲー異常図を基に作成した。

➤ 敷地近傍には地震基盤の形状の急激な変化を示唆する顕著な線状の重力異常急変部は認められないことから、敷地近傍の地震基盤に顕著な不整形はないものと考えられる。

(1) 検討方法

- 敷地周辺の地震基盤より深部(深さ5km程度以深※)の速度構造を把握するため、地震波トモグラフィーに基づくP波速度構造及びS波速度構造を確認した。
- Matsubara et al.(2022)は、防災科学技術研究所のHi-netやS-netのデータ等を含む地震波トモグラフィーにより、日本海と太平洋を含む日本列島周辺の3次元速度構造を評価している。
- また、防災科学技術研究所は、Matsubara et al.(2022)による3次元速度構造から、地図上で深さや位置を任意に指定して、速度構造断面を表示することが可能なソフトウェアを公開している。(https://www.hinet.bosai.go.jp/topics/sokudo_kozo/software.php?LANG=ja)
- P波速度構造及びS波速度構造の確認は、防災科学技術研究所によるソフトウェアを用い、Matsubara et al.(2022)による敷地周辺の速度構造断面を確認することで実施した。



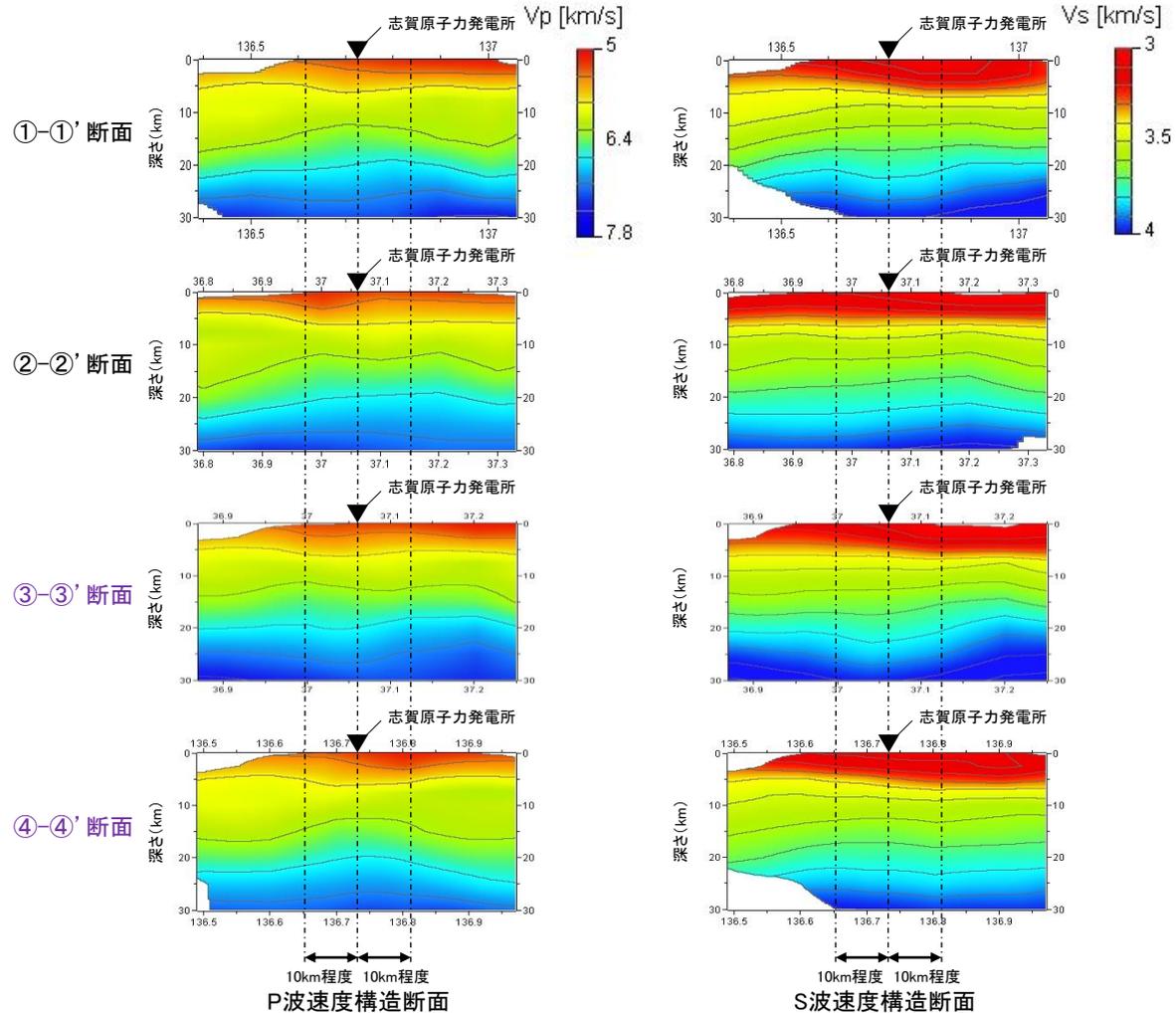
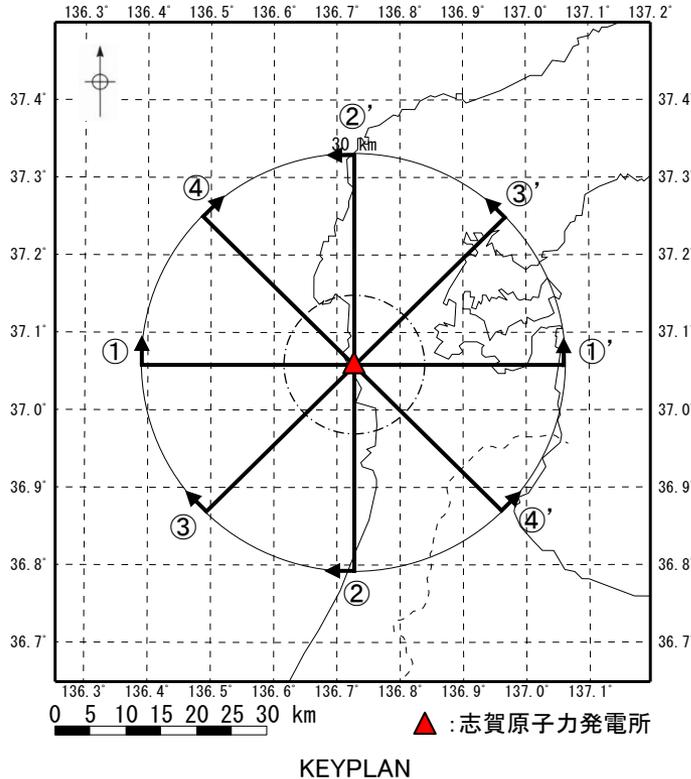
Matsubara et al.(2022)による深さごとの速度構造マップ(P波速度)

※ Matsubara et al.(2022)より抜粋

※ 深さ5km程度以浅については、敷地周辺における屈折法地震探査による検討結果(P.116)及び微動アレー探査による検討結果(P.119)において詳細な速度構造を把握できていることから、ここでは深さ5km程度以深を対象とした。

(2) 検討結果

- Matsubara et al.(2022)による敷地周辺の速度構造断面を下図に示す。
- この速度構造断面によると、敷地から10km程度の範囲においては、深さ5km程度以深の速度構造は概ね水平な層構造を呈している。



Matsubara et al.(2022)による敷地周辺の速度構造断面

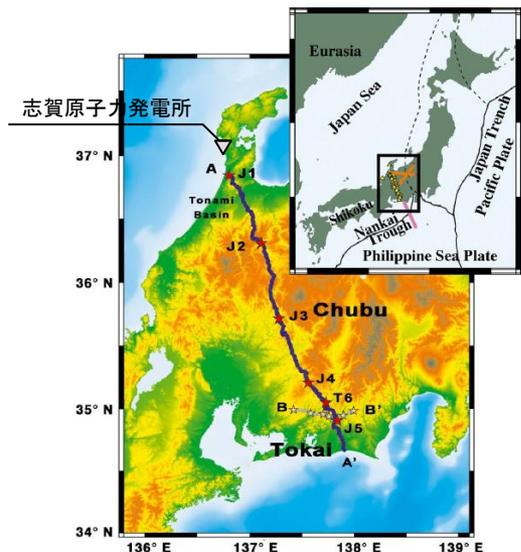
※ 防災科学技術研究所のソフトウェアを用いて表示した図に一部加筆

紫字は第1199回審査会合以降に追加した箇所

➤ Matsubara et al.(2022)による敷地周辺の速度構造断面より、敷地から10km程度の範囲においては、深さ5km程度以深の速度構造に顕著な不整形はみられない。

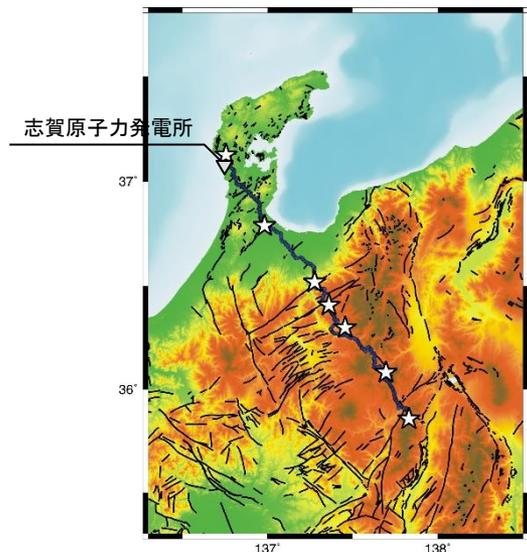
(1) 検討方法

- 敷地周辺の地震基盤の位置及び形状、並びに地震基盤より深部の速度構造を把握するため、文献及び当社による屈折法地震探査に基づくP波速度構造を確認した。
- Iidaka et al.(2003)及びIidaka et al.(2008)は、中部日本を横断する測線において、屈折法地震探査を実施し、敷地周辺のP波速度構造断面を評価している。
- また、当社は、敷地から南東方向に約13kmの測線において、屈折法地震探査を実施し、深さ3km以浅のP波速度構造を推定している。



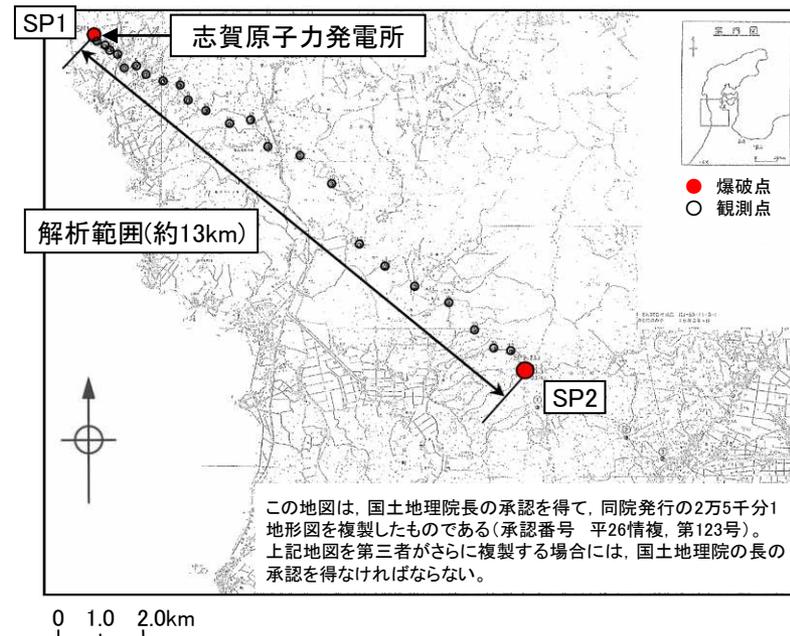
※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆

Iidaka et al.(2003)の調査測線図(A-A')
(★は爆破点を示す。)



※ Iidaka et al.(2008)に一部加筆

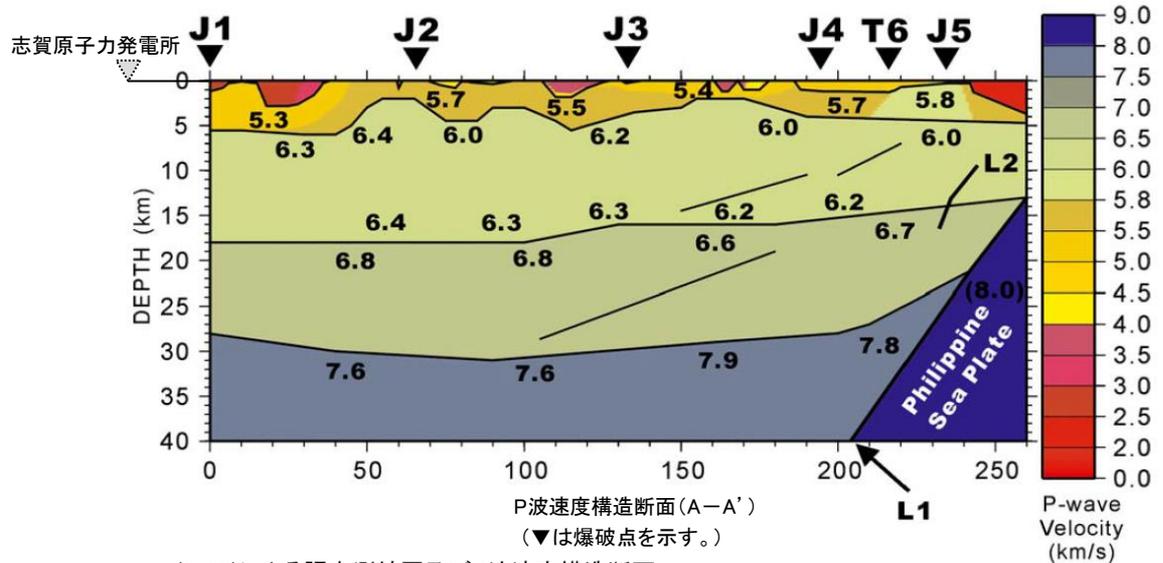
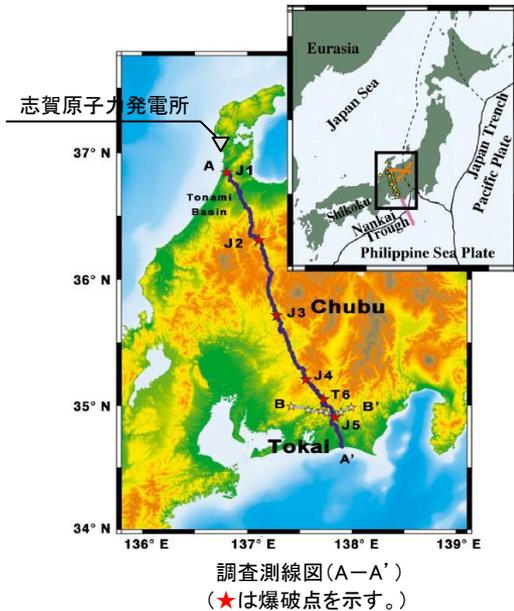
Iidaka et al.(2008)の調査測線図
(☆は爆破点を示す。)



当社の実施した調査測線図

(2) lidaka et al.(2003)による検討結果

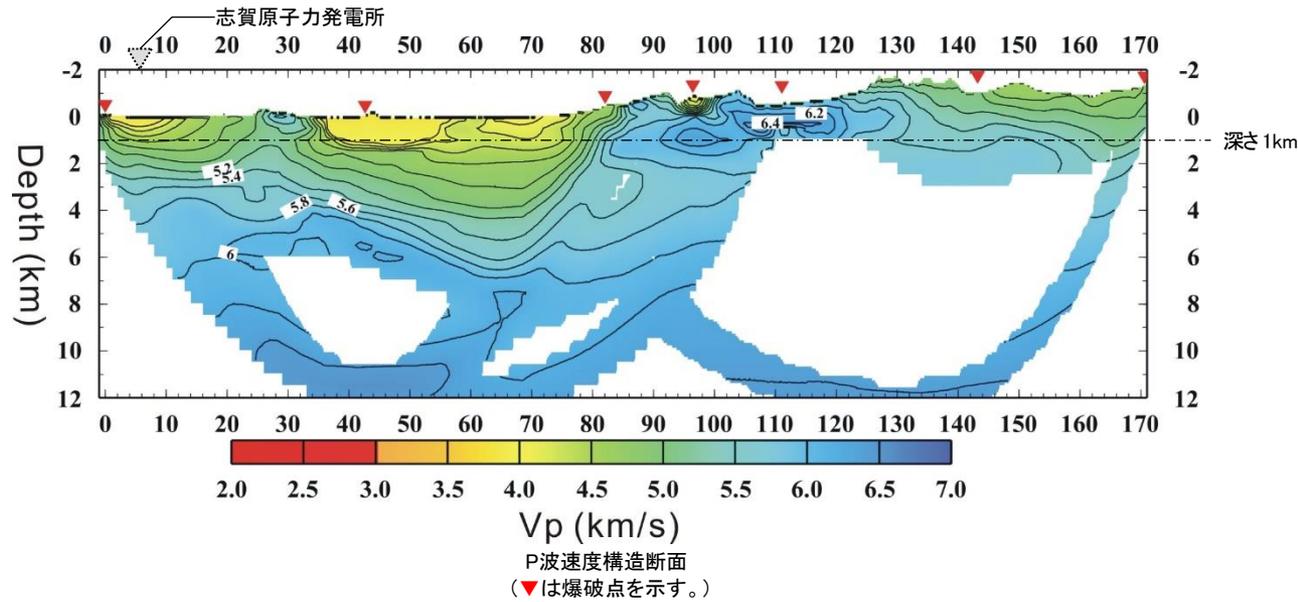
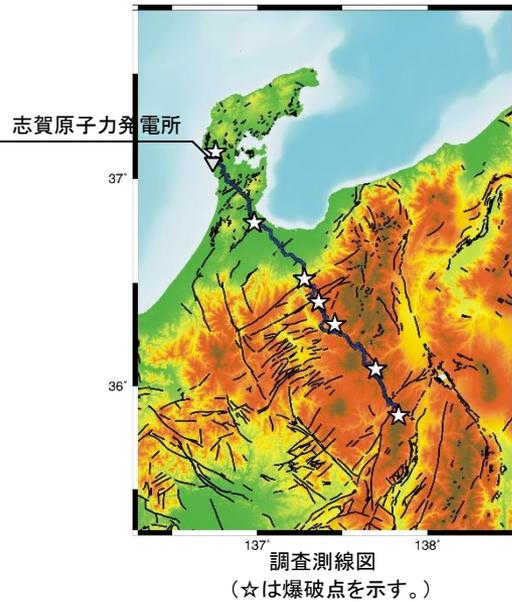
- lidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面を下図に示す。
- この断面によると、敷地周辺において、地震基盤に相当すると考えられるP波速度が5.3~5.8km/sの層が広く分布し、この層より深部については、上から、P波速度が6.0~6.4km/s, 6.6~6.8km/s, 7.6~7.9km/sの層が概ね水平に分布している。



※ lidaka et al.(2003)に一部加筆

(3) lidaka et al.(2008)による検討結果

- lidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面を下図に示す。
- この断面によると、敷地から10km程度の範囲において、敷地の地震基盤(深さ1km程度)より深部の速度層は概ね水平に分布している。

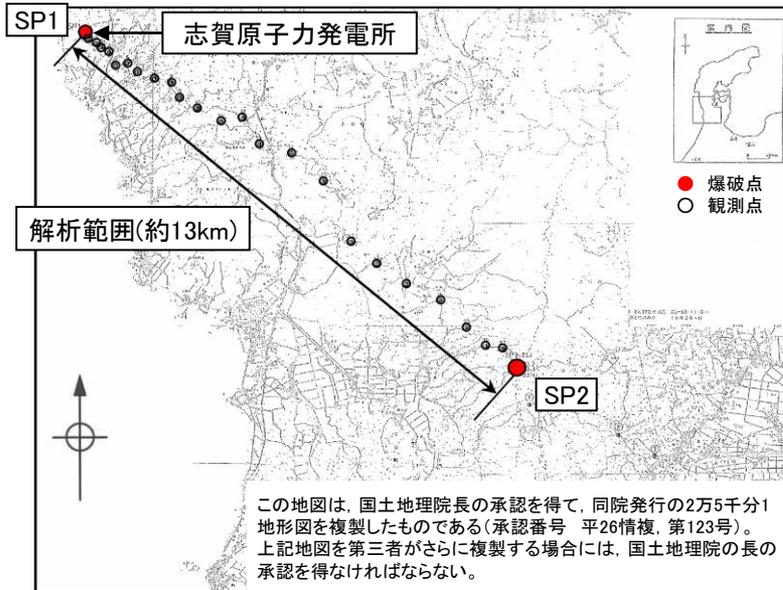


lidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ lidaka et al.(2008)に一部加筆

(4) 当社による検討結果

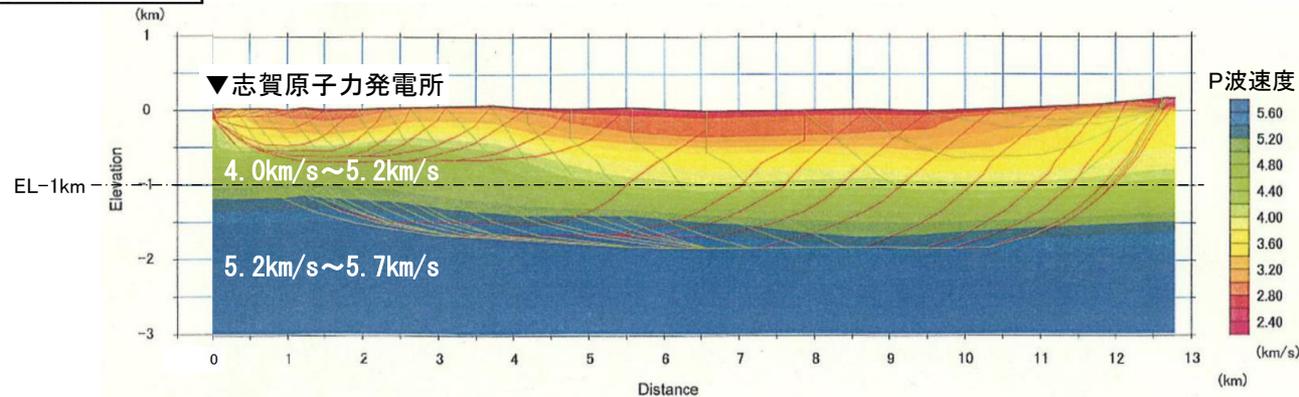
- 当社による屈折法地震探査は、爆破点2地点及び観測点23点において1985年11月24日に実施した。調査測線図、観測装置の仕様及びP波速度構造断面を下記に示す。
- 敷地周辺において、地震基盤に相当すると考えられるP波速度5.2～5.7km/sの層上面はEL-1km程度の位置にあり、概ね水平に分布している。



調査測線図

観測装置の仕様

項目	仕様
名称	ARP-4400
製造会社	日本物理探鉱(株)
チャンネル数	4
記録再生方式	FM
成分	3成分(水平動2成分・上下動1成分)
周波数範囲(周波数帯域)	4~100Hz
電源	内蔵電池12V×2

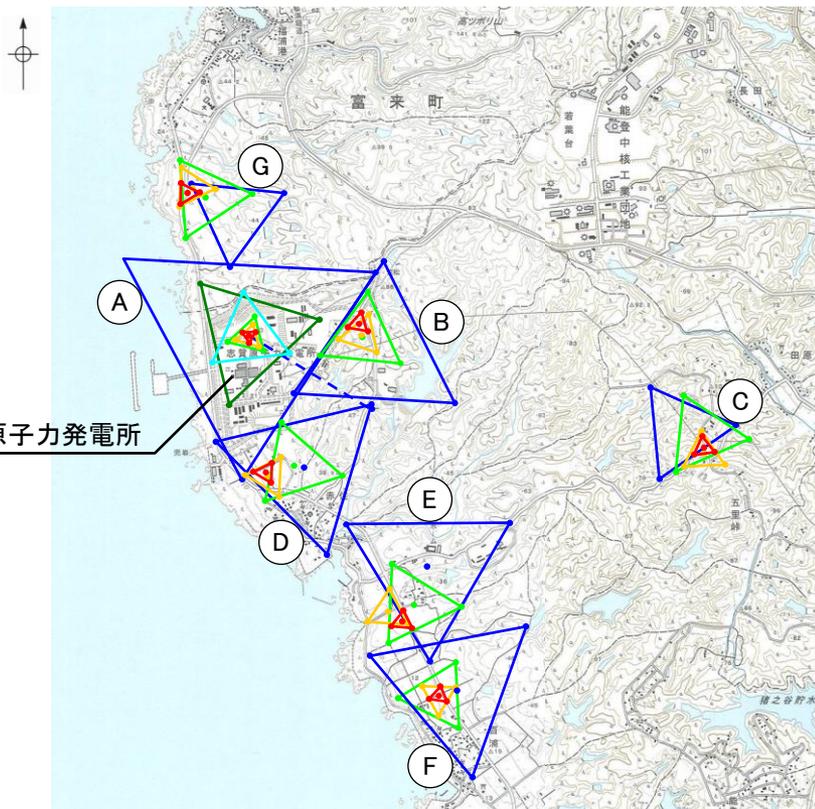


P波速度構造断面

- 「Iidaka et al.(2003)による検討結果」、「Iidaka et al.(2008)による検討結果」及び「当社による検討結果」より、敷地周辺の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。また、敷地から10km程度の範囲において、地震基盤より深部の速度構造に顕著な不整形はみられない。

(1) 検討方法

- 敷地近傍の地震基盤の位置及び形状を把握するため、微動アレー探査に基づくS波速度構造を確認し、地震基盤に相当する層の上面の深さを複数の地点で比較した。
- 微動アレー探査のための微動観測は、敷地を対象としたAアレーでは半径50～1000mの6種類、敷地の周辺を対象としたB～Gアレーでは半径80～640mの4種類とし、原則としてアレーの中心点1箇所及びその円周上で正三角形となる3箇所に微動計を設置し、2007年11月26日及び27日並びに2008年7月26日から8月1日の期間の中で実施した。微動アレー探査地点及び微動計の仕様を下記に示す。



志賀原子力発電所

0 0.5 1.0km

この地図は、国土地理院長の承認を得て、同院発行の2万5千分1地形図を複製したものである(承認番号 平26情複, 第123号)。上記地図を第三者がさらに複製する場合には、国土地理院の長の承認を得なければならない。

微動アレー探査地点

Aアレー※1

- 半径 = 50m
- 半径 = 100m
- 半径 = 150m
- 半径 = 300m
- 半径 = 500m
- 半径 = 1000m

B～Gアレー※2

- 半径 = 80m
- 半径 = 160m
- 半径 = 320m
- 半径 = 640m

微動計の仕様

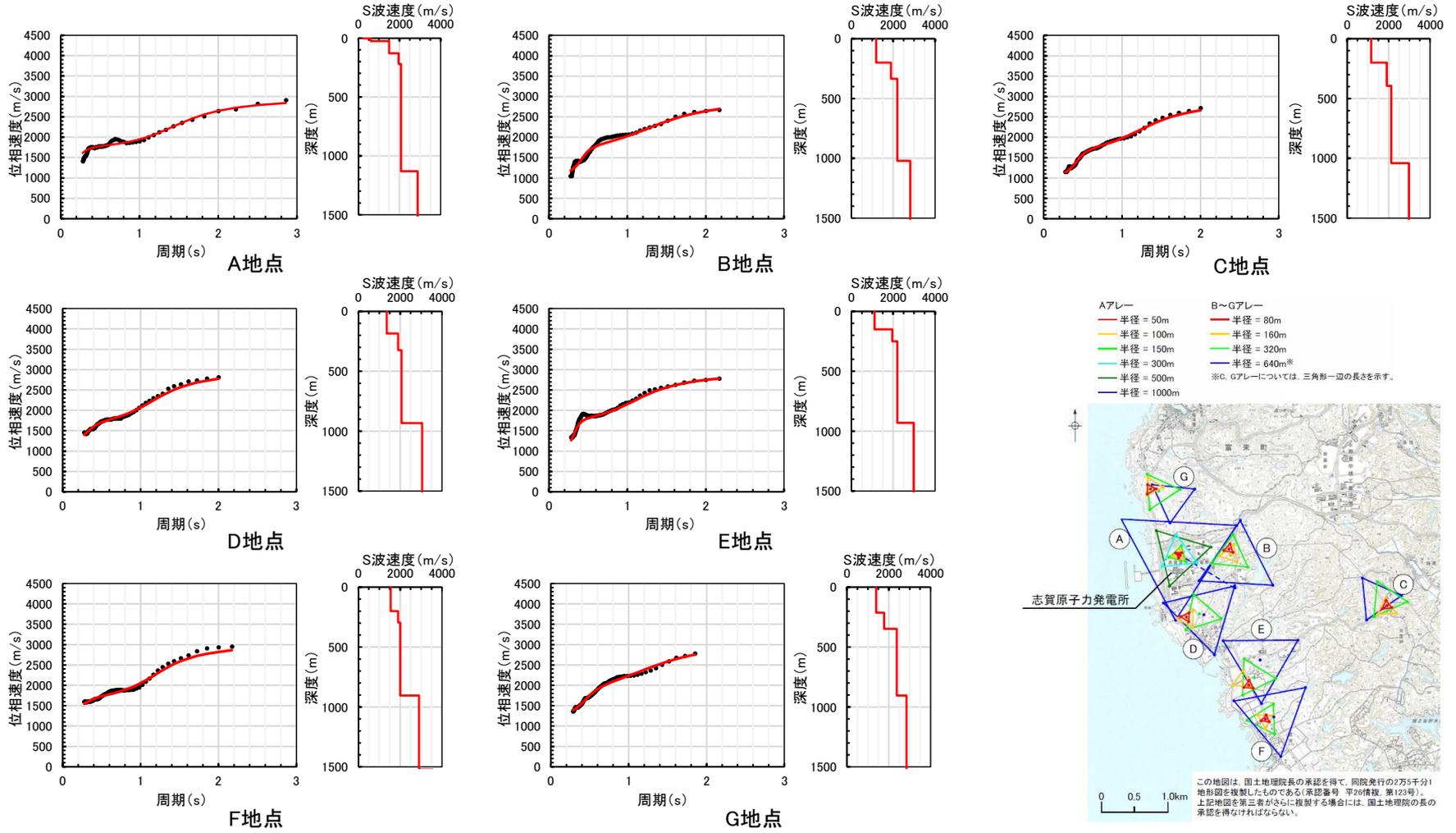
項目		仕様
地震計	名称	LE-3D/5S 改
	製造会社	レナーツ社(独)
	成分	3成分(水平2成分・上下動1成分)
	固有周期	5/7秒切り替え式
	電圧	DC12V
	出力感度	4V/kine
	センサー形式	速度型
収録装置	名称	LS-8000SH
	製造会社	白山工業
	チャンネル数	3
	分解能	16bit
	サンプリング周波数	100Hz
電源		DC6～9V
周波数範囲(周波数帯域)		0.14～50Hz

※1 Aアレーの半径 = 1000mについては、三角形の頂点のうち1箇所が海上となるため、円の中心と反対側に設置する変形アレーを適用した。

※2 C, Gアレーの半径 = 640mについては、半径 = 640mの円周上での設置が困難であったため、三角形一辺の長さが640mとなる中心点なしのアレーを適用した。

(2) 検討結果

- 推定した各地点のS波速度構造を下図に示す。
- 地震基盤に相当するS波速度3km/s程度の層の上面は深さ1km程度の位置にあり、概ね水平に分布している。



各地点の分散曲線(左)及び推定したS波速度構造(右)

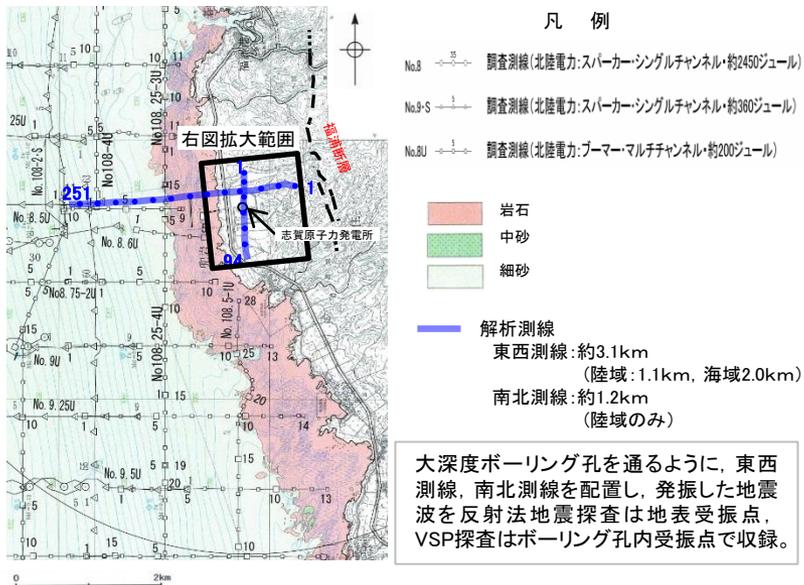
【分散曲線の凡例】 ● : 観測 — : 理論

微動アレー探査地点

➤ 微動アレー探査に基づく各地点のS波速度構造より、敷地近傍の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。

(1) 検討方法

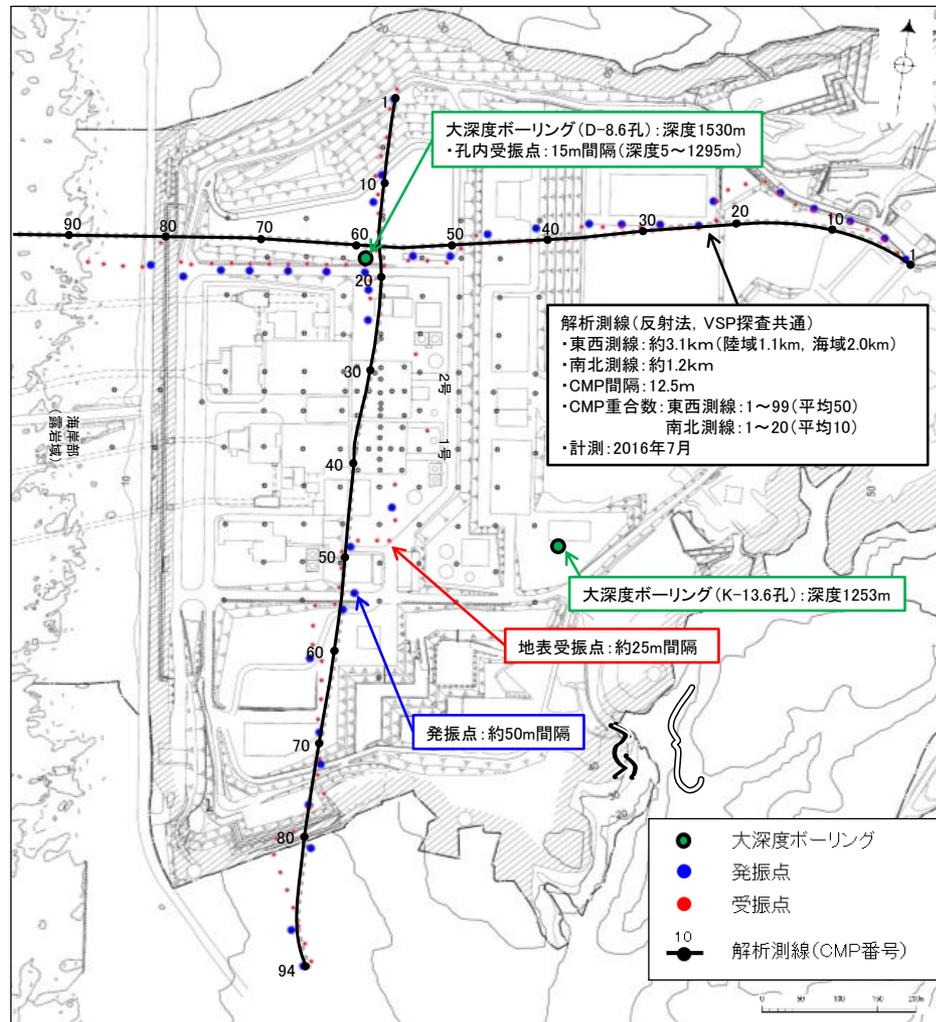
○ 敷地の地震基盤の位置及び形状を把握するため、大深度ボーリング孔を用いたVSP探査及び海陸連続で測線を配置した反射法地震探査(2016年)に基づく反射断面を確認した。



調査位置図(石川県, 1997年に一部加筆)

探査仕様

	発振源	仕様	発振間隔	受振間隔
陸域	大型パイプレータ	<ul style="list-style-type: none"> ・18t×2台 ・起振マス:2.3t, 2.6t(最大荷重18t) ・発振周波数:10~70Hz 	50m	25m(地表) 15m(孔内)
海域	エアガン	<ul style="list-style-type: none"> ・480cu.in. 	25m	25m

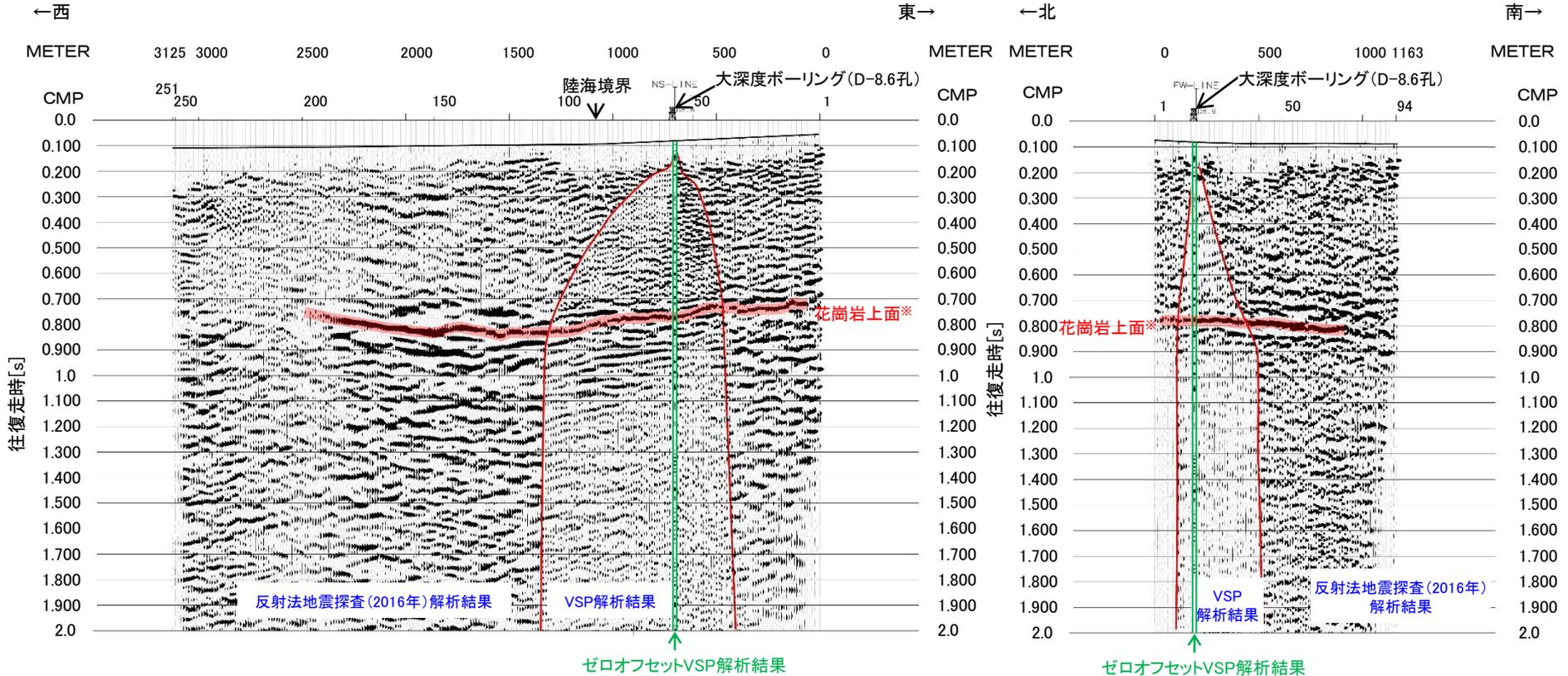


調査位置図

・敷地内には上記の測線以外に、福浦断層の調査を目的とした反射法地震探査(A測線)が通過しているが、同探査記録では、地震基盤(花崗岩上面)の形状は確認できない(詳細はデータ集P.139~141)。

(2) 検討結果 - マイグレーション処理前の時間断面 -

○ マイグレーション処理前の時間断面を下図に示す。



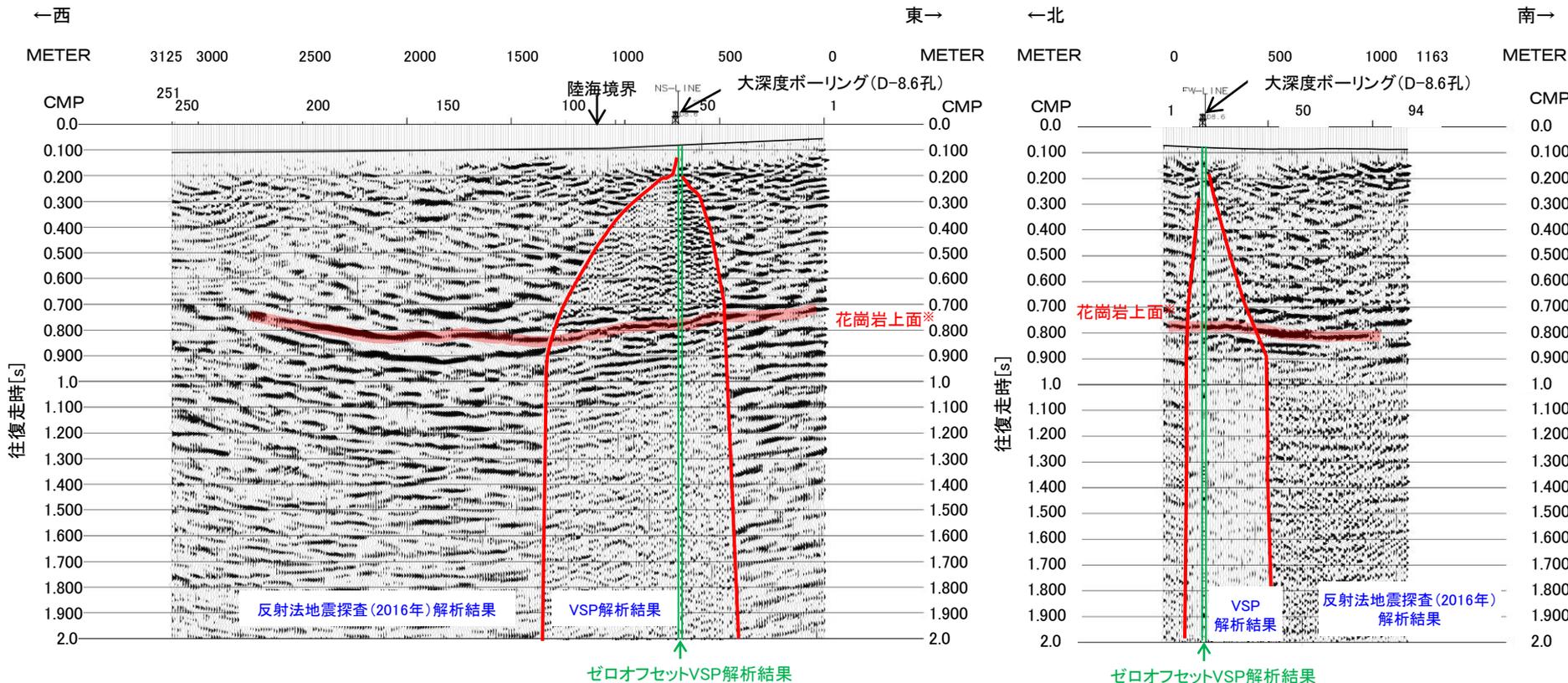
反射法地震探査(2016年)・VSP探査結果
 (東西測線:時間断面)

反射法地震探査(2016年)・VSP探査結果
 (南北測線:時間断面)

※ 花崗岩上面の解釈線は、重合数が相対的に多い測線中央付近から反射面が連続的に追跡でき、信頼性が高いと考えられる区間について記載

(2) 検討結果 - マイグレーション処理後の時間断面 -

○ マイグレーション処理後の時間断面を下図に示す。



反射法地震探査(2016年)・VSP探査結果
 (東西測線:時間断面)

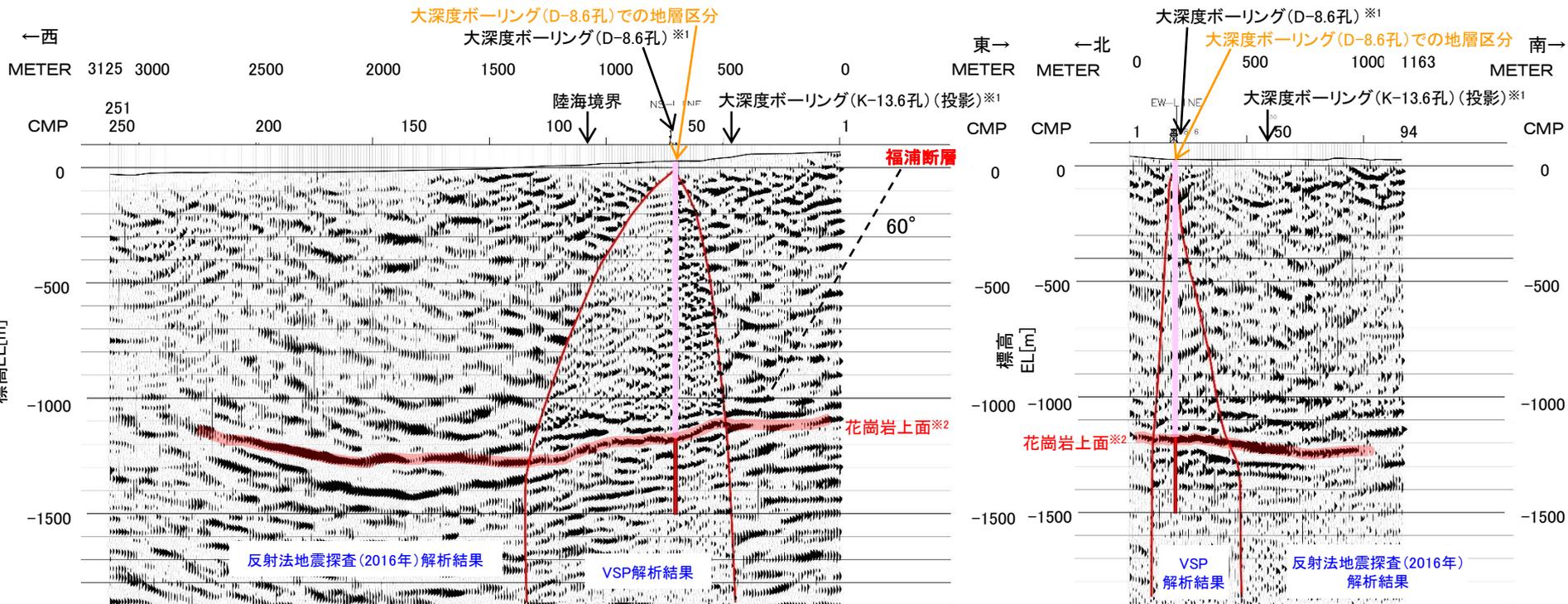
反射法地震探査(2016年)・VSP探査結果
 (南北測線:時間断面)

※ 花崗岩上面の解釈線は、重合数が相対的に多い測線中央付近から反射面が連続的に追跡でき、信頼性が高いと考えられる区間について記載

(2) 検討結果 - 深度断面 -

- 深度断面を下図に示す。
- 探査の結果、花崗岩上面(地震基盤)に相当する反射面は深さ1km程度の位置にあり、EL -1100~-1300mの範囲で概ね水平に分布している。

・マイグレーション処理後の時間断面(前頁)から深度変換を行い作成。



・反射法地震探査区間における花崗岩上面付近での垂直分解能は32~35m程度。

大深度ボーリングでの地層区分

- : 古第三系~新第三系
(安山岩, 凝灰角礫岩, 砂岩と頁岩の互層, 礫層)
- : 花崗岩

※1 D-8.6孔(P.90)とK-13.6孔(P.91)により確認された花崗岩上面の高度差約180m(P.91)については、重力探査の結果で敷地近傍に顕著な線状の重力異常急変部が認められず(P.111)、反射法地震探査・VSP探査結果で断層が認められないこと、花崗岩上面に相当する反射面に同程度の高度差(約100~200m)が認められることから、敷地の地下深部における花崗岩上面の凹凸の範囲内であると判断した。

※2 花崗岩上面の解釈線は、重合数が相対的に多い測線中央付近から反射面が連続的に追跡でき、信頼性が高いと考えられる区間について記載

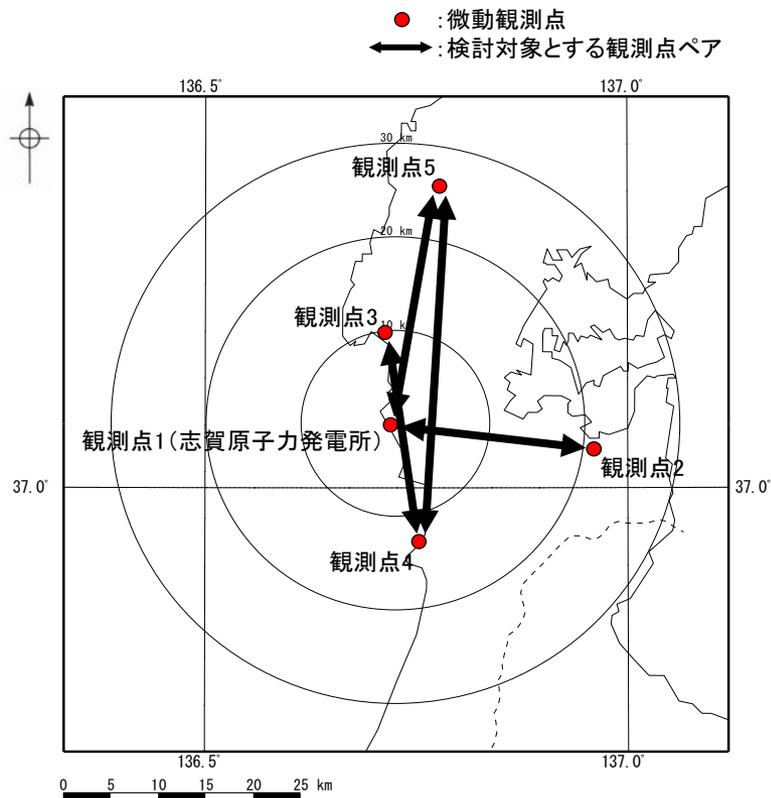
反射法地震探査(2016年)・VSP探査結果
(東西測線: 深度断面)

反射法地震探査(2016年)・VSP探査結果
(南北測線: 深度断面)

➤ 反射法地震探査・VSP探査に基づく反射断面より、敷地の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。

(1) 検討方法

- 敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を把握するため、地下の速度構造が反映されている広域微動観測記録に基づき複数の観測点ペアで評価した群速度を比較した。
- 微動観測は敷地内外の5地点において、2014年6月26日から順次実施している。微動観測点配置図及び観測開始日並びに微動計の仕様を下記に示す。
- 群速度は、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を把握する観点から、観測点の一方が敷地となっている観測点ペア及び観測点間に敷地が含まれている観測点ペアのうち観測点間距離が比較的長い観測点ペア(4組)で評価した。



微動観測点配置図

観測開始日

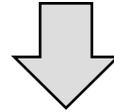
観測点1,2,3	2014年6月26日
観測点4	2015年2月10日
観測点5	2017年1月18日

微動計の仕様

項目	仕様
地震計	3成分加速度計(ミツヨ製JEP-6A3)
データロガー	LS-8000(白山工業製)
電源供給	バッテリー
データ収録	連続観測(100Hzサンプリング) GPSによる時刻校正

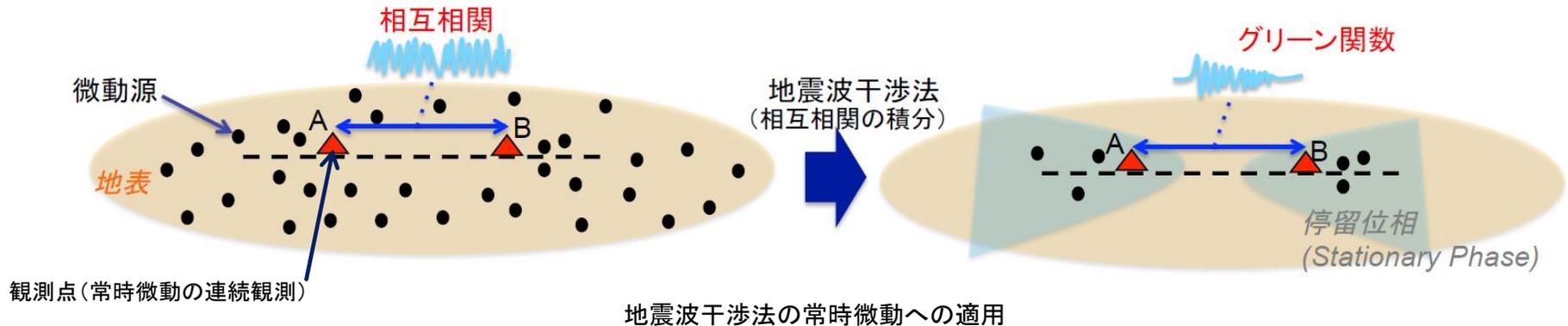
(2)地震波干渉法の原理及び群速度の評価方法

- 地表の2点間で観測された波動場の相互相関によって、一方の観測点にインパルス信号を与え、もう一方の観測点で観測した際の記録(グリーン関数)を合成できる。(Wapenaar(2004))



常時微動への適用
Shapiro and Campillo(2004)

- 無数の振源で囲まれた領域中の2点間で微動を計測し、各振源による相互相関を全て積分(スタック処理)すると、停留位相点と呼ばれる領域以外の成分は打ち消し合い、2点間のグリーン関数のみが残る。



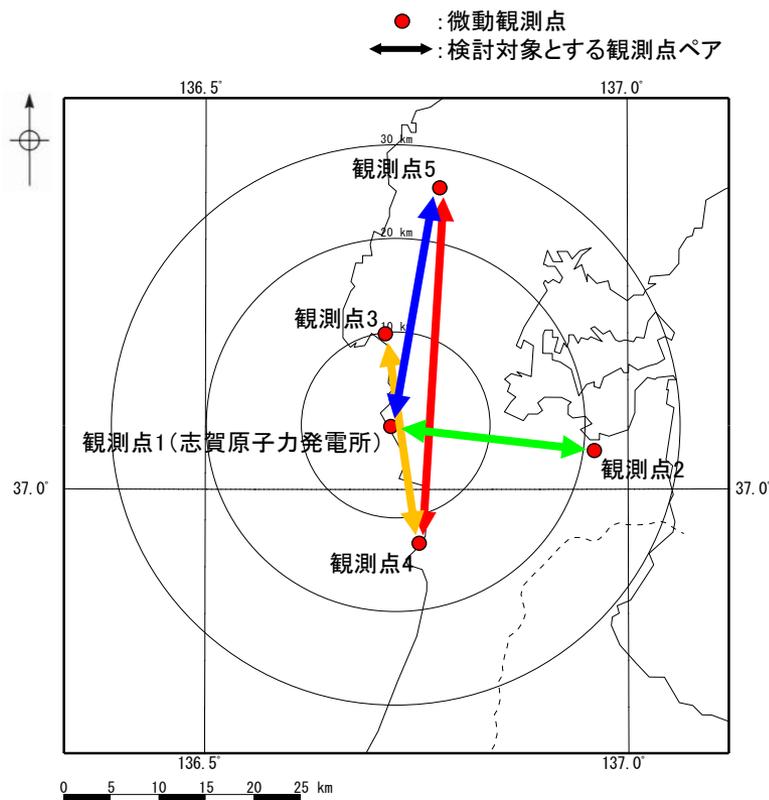
- 群速度の評価方法を下記に示す。

- ① 1時間分の連続記録の相互相関を全日数分スタック処理し、グリーン関数を評価※
- ② グリーン関数の狭帯域フィルタ処理から、周期ごとのフィルター波形とそのエンベロープ(包絡線)を評価
- ③ 観測点間距離をエンベロープの最大値時刻で除し、周期ごとの群速度を評価

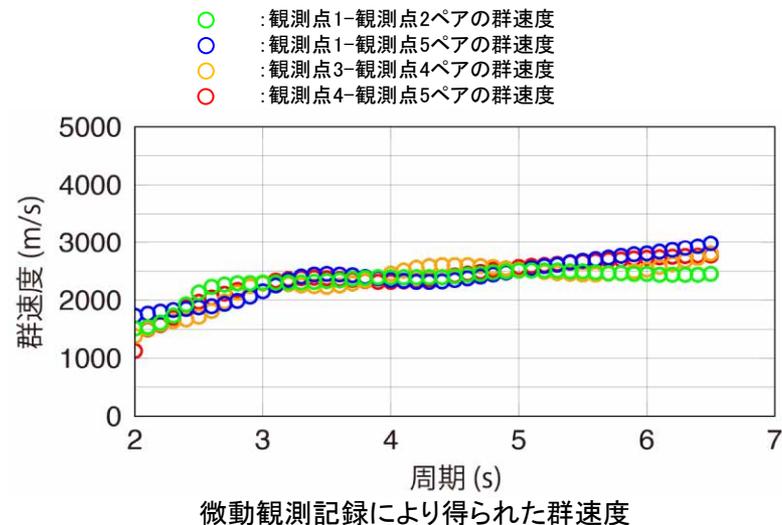
※ 相互相関関数の評価結果は、データ集P.145~153。

(3) 検討結果

- 微動観測記録により得られた群速度(右下図)は、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられる周期2秒程度より長周期側※において、いずれも同様の分散性を示す。



微動観測点配置図



※ 群速度における周期2秒程度より長周期側が、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられることについては、次頁参照。

- 微動観測記録により得られた群速度は、周期2秒程度より長周期側において、いずれも同様の分散性を示すことから、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造に、顕著な不整形はないものと考えられる。

(補足)検討の対象とする周期帯について

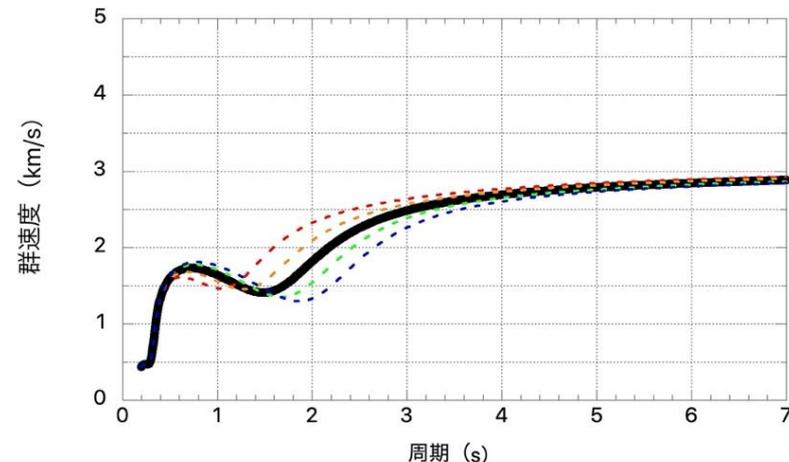
- 検討の対象とする周期帯を確認するため、2章で設定した地下構造モデルの地震基盤の位置を変動させた場合の速度構造に基づく理論群速度を算定した。算定した結果を右下図に示す。
- 理論群速度が周期2秒程度で変動していることから、敷地の地震基盤の位置が群速度へ影響を与える周期帯は周期2秒程度であり、群速度において、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を反映している周期帯は、周期2秒程度より長周期側であると考えられる。

2章で設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

地震基盤
▽

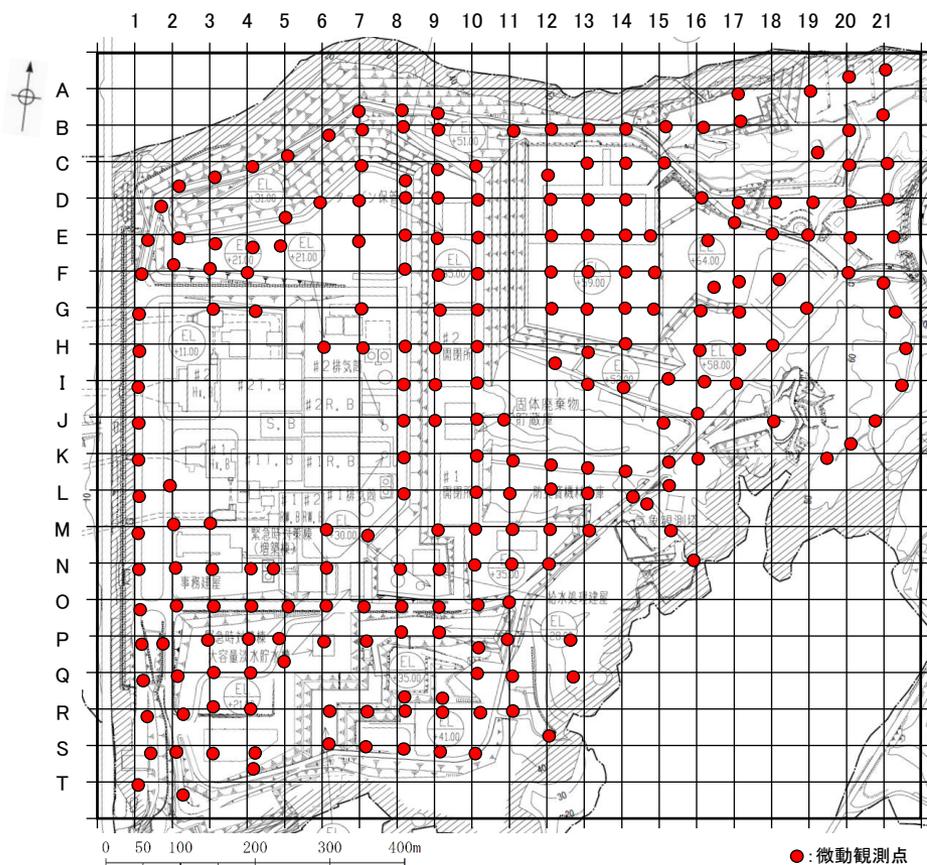
- : 地震基盤の位置(EL-1.19km)を200m浅くした場合
- : 地震基盤の位置(EL-1.19km)を100m浅くした場合
- : 地震基盤の位置(EL-1.19km)を変動させない場合
- : 地震基盤の位置(EL-1.19km)を100m深くした場合
- : 地震基盤の位置(EL-1.19km)を200m深くした場合



地震基盤の位置を変動させた場合の理論群速度

(1) 検討方法

- 敷地の地震基盤の形状を把握するため、微動H/Vスペクトル比を敷地の複数の観測点で比較するとともに、1.3節において実施した水平アレー地震観測記録を用いた検討結果との整合性を確認する。
- 微動観測は敷地の232地点※(約50m間隔)において、2014年1月13日～23日の期間の中で実施した。微動観測点配置図及び微動計の仕様を下記に示す。(P.78再掲)



微動観測点配置図

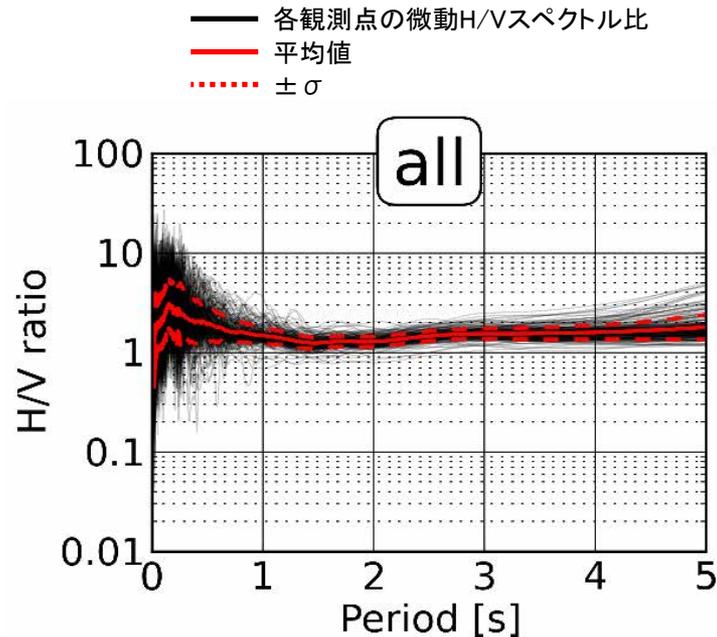
微動計の仕様

項目		仕様
地震計	名称	LE-3D/5S 改
	製造会社	レナーツ社(独)
	成分	3成分(水平動2成分・上下動1成分)
	固有周期	5/7秒切り替え式
	電圧	DC12V
	出力感度	4V/kine
	センサー形式	速度型
収録装置	名称	LS-8000
	製造会社	白山工業
	チャンネル数	3
	分解能	24bit
	サンプリング周波数	100Hz
電源		DC6～16V
周波数範囲(周波数帯域)		0.14～50Hz

※ 微動観測点は、敷地において約50m間隔に設置することを基本としているが、施設の設置状況や工事状況等を考慮して配置した。

(2) 単点微動探査による検討結果 —地震基盤の形状—

- 各観測点の微動H/Vスペクトル比を比較した結果を下図に示す。
- 周期1秒程度より短周期側は観測点により変動がみられる※1が、敷地の地震基盤の位置を反映していると考えられる周期2秒程度※2において、各観測点の微動H/Vスペクトル比に顕著な違いはない。



各観測点の微動H/Vスペクトル比の詳細はデータ集P.155～159。

各観測点の微動H/Vスペクトル比の比較

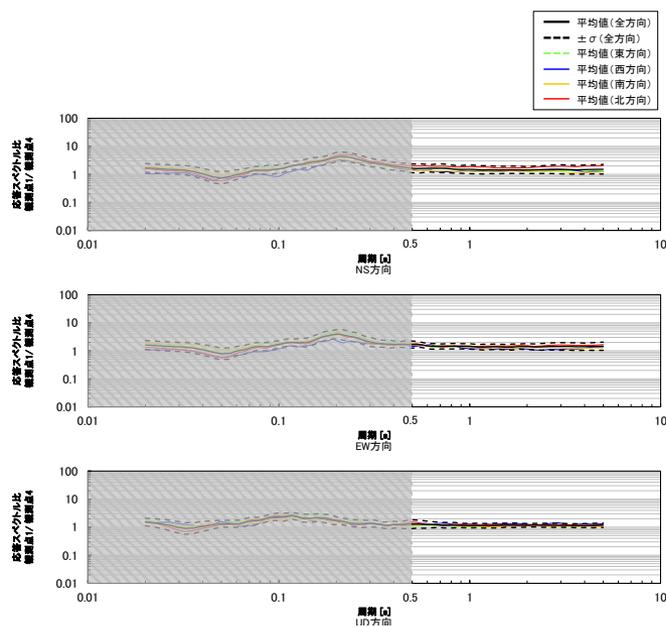
※1 微動H/Vスペクトル比における周期1秒程度より短周期側において、観測点により変動がみられることについての分析は、P.132参照。

※2 微動H/Vスペクトル比における周期2秒程度が、敷地の地震基盤の位置を反映していると考えられることについては、P.133参照。

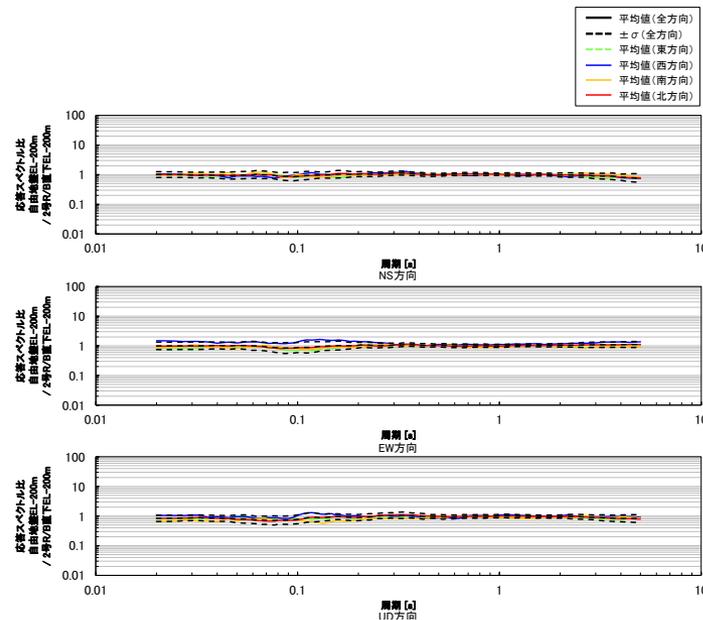
- 単点微動探査による検討結果によれば、周期2秒程度において、各観測点の微動H/Vスペクトル比に顕著な違いはないことから、敷地の地震基盤の形状に顕著な不整形はないものと考えられる。

(3) 観測記録を用いた検討結果(1.3節)

- 1.3節において実施した水平アレー地震観測記録を用いた検討結果を確認した。
- 敷地の地震基盤以浅を対象とした水平アレー地震観測記録(地表)(到来方向別)を用いた検討結果(1.3.3項(P.162))によれば、観測点4に対する観測点1~3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1~4周辺の地震基盤以浅(表層地盤を除く)に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。
- 敷地の地震基盤~EL-200mを対象とした水平アレー地震観測記録(地中)(到来方向別)を用いた検討結果(1.3.4項(P.166))によれば、2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、2号原子炉建屋直下地震観測点周辺と自由地盤地震観測点周辺のEL-200m~地震基盤に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。



応答スペクトル比(観測点1/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較(1.3.3項)



応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋直下EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較(1.3.4項)

- 水平アレー地震観測記録を用いた検討(1.3.3項~1.3.4項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅(地震基盤の形状を含む)に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

(4) 検討結果の整合性確認

- 単点微動探査による検討結果と1.3節において実施した水平アレー地震観測記録を用いた検討結果について整合性を確認する。

単点微動探査による検討結果

- 単点微動探査による検討結果によれば、周期2秒程度において、各観測点の微動H/Vスペクトル比に顕著な違いはみられないことから、敷地の地震基盤の形状に顕著な不整形はないものと考えられる。

整合性確認



1.3節において実施した水平アレー地震観測記録を用いた検討結果

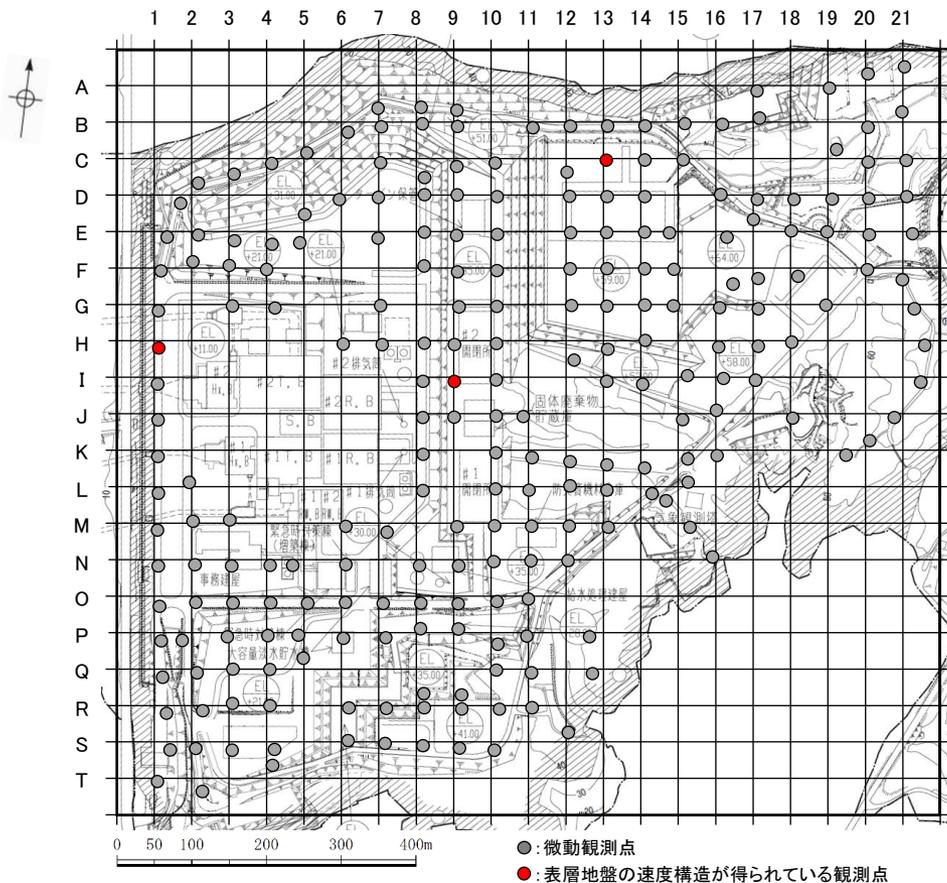
- 水平アレー地震観測記録を用いた検討(1.3.3項～1.3.4項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅(地震基盤の形状を含む)に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。



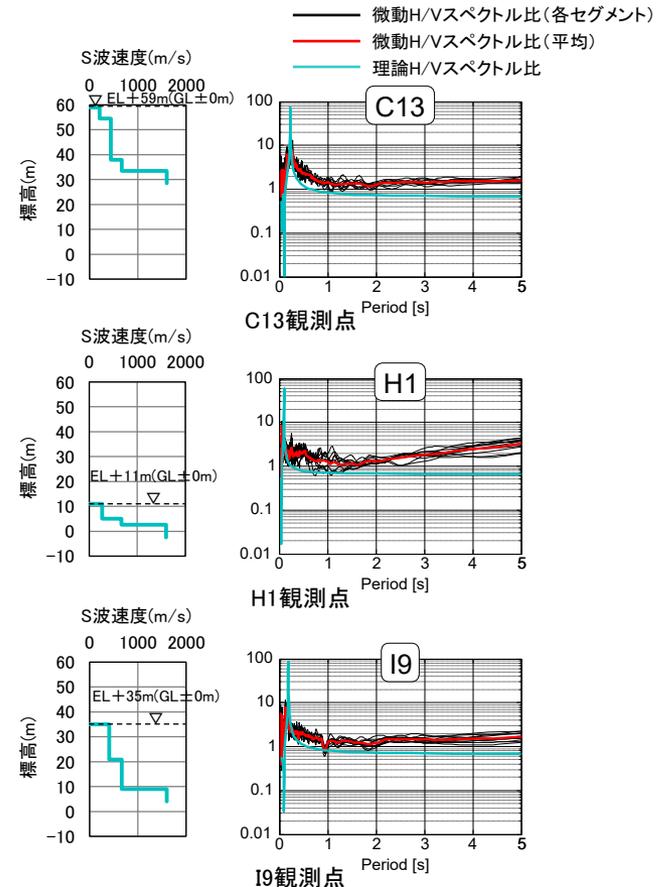
- 単点微動探査による検討結果(周期2秒程度において、各観測点の微動H/Vスペクトル比に顕著な違いはみられないことから、敷地の地震基盤の形状に顕著な不整形はないものと考えられること)は、1.3節において実施した水平アレー地震観測記録を用いた検討結果(敷地の地震基盤以浅(地震基盤の形状を含む)に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられること)と整合的である。

(補足)微動H/Vスペクトル比の短周期側における変動の分析について

- 周期1秒程度より短周期側において、微動H/Vスペクトル比が観測点により変動していることを分析するため、微動H/Vスペクトル比と表層地盤の速度構造に基づく理論H/Vスペクトル比を比較した。
- 比較の対象とする観測点は、微動アレー探査により表層地盤の速度構造が得られている※C13観測点、H1観測点及びI9観測点とし、観測点の配置図及び比較した結果を下图に示す。
- 周期1秒程度より短周期側のピーク形状は、微動H/Vスペクトル比と理論H/Vスペクトル比と同様な傾向を示していることから、周期1秒程度より短周期側において、微動H/Vスペクトル比が観測点により変動していることの要因は、各観測点の表層地盤の速度構造の違いであると考えられる。なお、微動観測記録には、観測点周辺における作業や車両走向等による実体波が一定程度混在し、地形や構造物等により浅部で生じる反射波や散乱波の影響を受けていることも考えられる。



比較の対象とした観測点の配置図



比較の対象とした観測点の表層地盤の速度構造(左)と微動H/Vスペクトル比と理論H/Vスペクトル比の比較(右)

※ 表層地盤の速度構造は、水平アレー地震観測点(地表)の設置に際して、観測点の基礎情報として、観測点の周辺において半径数m程度の三角形アレーを複数配置した微動アレー探査により推定した。

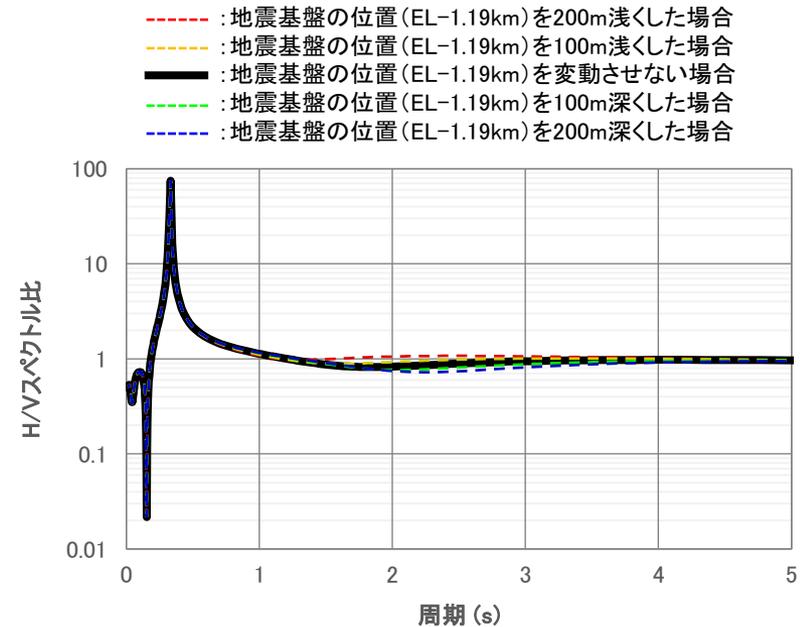
(補足)検討の対象とする周期帯について

- 敷地の地震基盤の位置が微動H/Vスペクトル比へ影響を与える周期帯を確認するため、2章で設定した地下構造モデルの地震基盤の位置を変動させた場合の速度構造に基づく理論H/Vスペクトル比を算定した。算定した結果を右下図に示す。
- 理論H/Vスペクトル比が周期2秒程度で変動していることから、敷地の地震基盤の位置が微動H/Vスペクトル比へ影響を与える周期帯は周期2秒程度であると考えられる。

2章で設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

地震基盤
▽



地震基盤の位置を変動させた場合の理論H/Vスペクトル比

○ 敷地の地震基盤は、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の記載事項及び敷地地盤の特徴を踏まえて設定する。

■「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の記載事項

「地震基盤」とは、せん断波速度 $V_s=3000\text{m/s}$ 程度以上の地層をいう。

■敷地地盤の特徴

【1.1節 地質・地質構造の調査による地下構造の検討】

- 大深度ボーリング調査結果(D-8.6孔, K-13.6孔)によれば、原子炉設置位置付近の地震基盤以浅の地質は、下位から先第三紀の花崗岩、古第三紀の榎原階(砂岩と頁岩の互層、礫岩)、新第三紀の岩稻階(安山岩、凝灰角礫岩)からなり、花崗岩以浅におけるP波速度及びS波速度はそれぞれ 4km/s 及び 2km/s 程度、花崗岩以深におけるP波速度及びS波速度はそれぞれ 5km/s 及び 3km/s 程度であり、密度は概ね $2\sim 3\text{t/m}^3$ の範囲を示す。(詳細は1.1.5項(P.89~91)参照)
- また、大深度ボーリング2孔(D-8.6孔, K-13.6孔)の花崗岩上面に約180mの高度差が認められることから、二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる検討を実施して、花崗岩上面の高度差が地震動へ与える影響を確認した結果、花崗岩上面の高度差をモデル化した二次元FEMモデル及び花崗岩上面の高度差をモデル化しない二次元FEMモデルを用いた地震動シミュレーションによる応答に顕著な違いはみられない。また、観測記録を用いた検討(1.3.3項~1.3.5項)の結果によれば、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられることより、敷地の花崗岩上面の高度差は、地震動へ与える影響は小さいものと考えられる。(詳細は1.1.5項(P.95~100)参照)

【1.2節 物理探査による地下構造の検討】

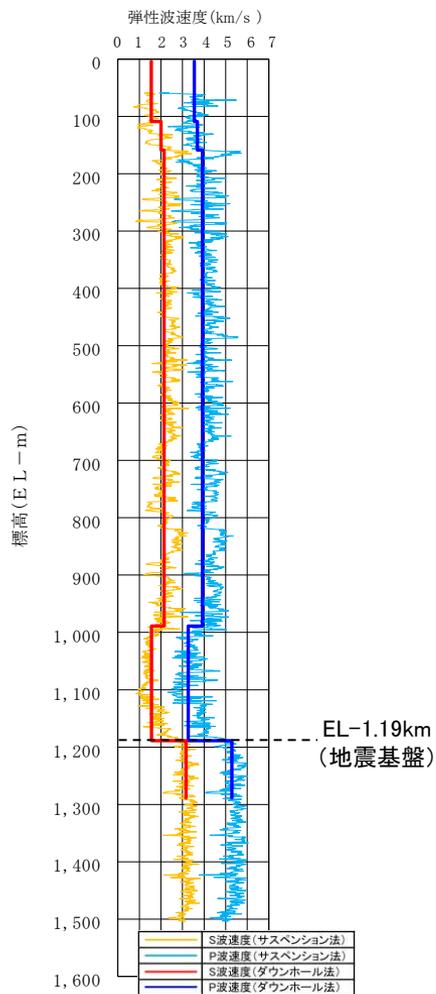
- 敷地周辺における重力探査の検討結果によれば、敷地近傍(敷地から半径5km範囲)の重力異常値はほぼ一定であり、高重力異常域と低重力異常域との境界は明瞭ではなく、敷地近傍には地震基盤の形状の急激な変化を示唆する顕著な線状の重力異常急変部は認められないことから、敷地近傍の地震基盤に顕著な不整形はないものと考えられる。(詳細は1.2.1項(P.110~111)参照)
- 敷地周辺における屈折法地震探査の検討結果によれば、敷地周辺の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。(詳細は1.2.3項(P.114~117)参照)
- 敷地近傍における微動アレー探査の検討結果によれば、敷地近傍の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。(詳細は1.2.4項(P.118~119)参照)
- 敷地における反射法地震探査・VSP探査の検討結果によれば、敷地の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。(詳細は1.2.5項(P.120~123)参照)
- 敷地における単点微動探査の検討結果によれば、敷地の地震基盤の位置を反映していると考えられる周期2秒程度において、各観測点の微動H/Vスペクトル比に顕著な違いはないことから、敷地の地震基盤の形状に顕著な不整形はないものと考えられる。(詳細は1.2.7項(P.128~129)参照)



➤ 以上の1.1節の地質・地質構造の調査による検討及び1.2節の物理探査による検討の結果から、敷地の地震基盤は水平で評価できることを確認した。

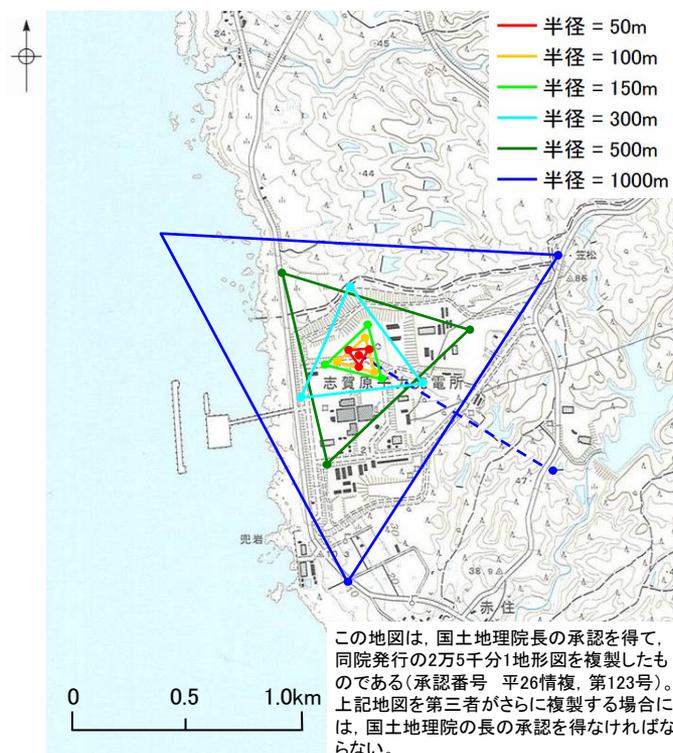
■地震基盤の設定

- 大深度ボーリング調査結果(D-8.6孔)のPS検層結果によれば、EL-1.19km以深でS波速度が3km/s程度以上となることから、地震基盤はEL-1.19kmである。
- また、地震基盤をEL-1.19kmとした場合の理論位相速度は、敷地における微動アレー探査により得られた位相速度と調和的である。



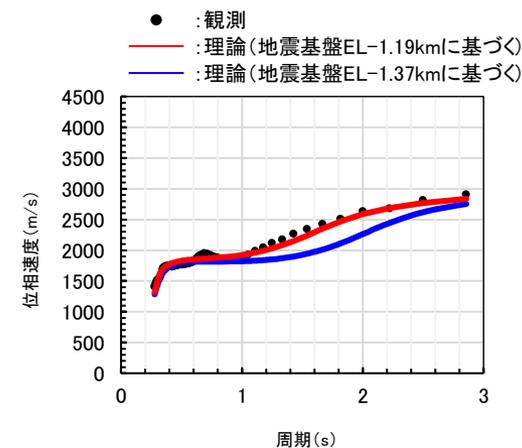
PS検層結果

大深度ボーリング調査結果(D-8.6孔)



微動アレー探査地点(A地点)

微動アレー探査結果



A地点の分散曲線

➤ 以上により、敷地の地震基盤はEL-1.19kmの位置に設定した。

まとめ(1/2)

- 地震基盤の位置及び形状、地震基盤より深部の地下構造の成層性及び均質性を評価するため、「地震基盤の位置及び形状」、「地震基盤より深部の速度構造」に関する物理探査による検討を実施した(1.2.1項～1.2.7項)。検討結果を下記に示す。
- また、これらの検討結果を踏まえ、敷地の地震基盤を設定した(1.2.8項)。

1.2.1 重力探査

- 敷地周辺の地震基盤の形状を把握するため、敷地周辺のブーゲー異常図及び水平一次微分図を確認した。
- 敷地近傍(敷地から半径5km範囲)の重力異常値はほぼ一定であり、高重力異常域と低重力異常域との境界は明瞭ではなく、敷地近傍には地震基盤の形状の急激な変化を示唆する顕著な線状の重力異常急変部は認められないことから、敷地近傍の地震基盤に顕著な不整形はないものと考えられる。

1.2.2 地震波トモグラフィ

- 敷地周辺の地震基盤より深部(深さ5km程度以深)の速度構造を把握するため、地震波トモグラフィに基づくP波速度構造及びS波速度構造を確認した。
- 敷地から10km程度の範囲においては、深さ5km程度以深の速度構造に顕著な不整形はみられない。

1.2.3 屈折法地震探査

- 敷地周辺の地震基盤の位置及び形状、並びに地震基盤より深部の速度構造を把握するため、Iidaka et al.(2003)、Iidaka et al.(2008)及び当社による屈折法地震探査に基づくP波速度構造を確認した。
- 敷地周辺の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。また、敷地から10km程度の範囲において、地震基盤より深部の速度構造に顕著な不整形はみられない。

1.2.4 微動アレー探査

- 敷地近傍の地震基盤の位置及び形状を把握するため、微動アレー探査に基づくS波速度構造を確認し、地震基盤に相当する層の上面の深さを複数の地点で比較した。
- 敷地近傍の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。

1.2.5 反射法地震探査・VSP探査

- 敷地の地震基盤の位置及び形状を把握するため、大深度ボーリング孔を用いたVSP探査及び海陸連続で測線を配置した反射法地震探査に基づく反射断面を確認した。
- 敷地の地震基盤は深さ1km程度であり、概ね水平に分布している。

まとめ(2/2)

1.2.6 広域微動探査

- 敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を把握するため、地下の速度構造が反映されている広域微動観測記録に基づき複数の観測点ペアで評価した群速度を比較した。
- 敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられる周期2秒程度より長周期側において、いずれも同様の分散性を示すことから、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造に、顕著な不整形はないものと考えられる。

1.2.7 単点微動探査

- 敷地の地震基盤の形状を把握するため、微動H/Vスペクトル比を敷地の複数の観測点で比較した。
- 敷地の地震基盤の位置を反映していると考えられる周期2秒程度において、各観測点の微動H/Vスペクトル比に顕著な違いはないことから、敷地の地震基盤の形状に顕著な不整形はないものと考えられる。また、水平アレー地震観測記録を用いた検討(1.3.3項～1.3.4項)の結果によれば敷地の地震基盤以浅(地震基盤の形状を含む)に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられることと整合的である。

1.2.8 地震基盤の設定

- 敷地の地震基盤は、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の記載事項及び敷地地盤の特徴を踏まえ、S波速度が3km/s程度以上となるEL-1.19kmの位置に設定した。

- 物理探査による地下構造の検討の結果、敷地周辺の地震基盤は、深さ1km程度であり概ね水平に分布している結果が得られていることから、概ね水平で評価できることを確認した。また、地震基盤より深部の地下構造については、顕著な不整形はないものと評価できることから、成層かつ均質と評価できることを確認した。
- また、敷地の地震基盤は、S波速度が3km/s程度以上であるEL-1.19kmの位置に設定した。

1.3 観測記録による地下構造の検討

検討方針

- 敷地の鉛直アレー地震観測記録により敷地地盤の増幅特性を把握する(1.3.1項)とともに、地震基盤以浅の地下構造の成層性及び均質性を評価するため、敷地内の複数地点で得られた地震観測記録を比較、検討する(1.3.2項～1.3.5項)。

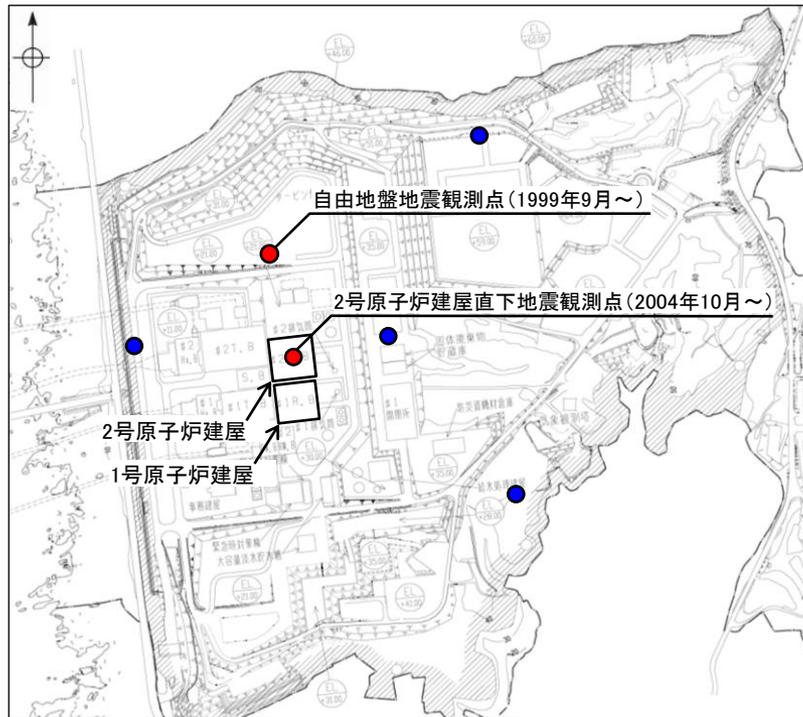
□ : 観測記録による地下構造の検討

調査項目	調査概要	調査の目的	対象		手法		地震動評価の3要素	詳細説明	
			水平方向	深さ方向	種別	内容			
1.3.1	鉛直アレー地震観測記録(深度別)を用いた検討	敷地の増幅特性(地震基盤～解放基盤表面)を把握するため、自由地盤地震観測点における深度別(EL+19.5m, EL-10m, EL-100m, EL-200m, EL-1,298m)の応答スペクトルより増幅傾向を確認する。	⑤地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地	地震基盤以浅(地震基盤～解放基盤表面)	①鉛直アレー地震観測	自由地盤地震観測点の深度別応答スペクトルを確認する。	サイト特性	P.141～152
1.3.2	鉛直アレー地震観測記録(到来方向別)を用いた検討	敷地のEL-200m～解放基盤表面を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、自由地盤地震観測点における応答スペクトル比(EL-10m/EL-200m)を地震波の到来方向ごとに比較する。	⑤地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地	地震基盤以浅(EL-200m～解放基盤表面)	①鉛直アレー地震観測	観測点間の応答スペクトル比を確認し、地震波の到来方向ごとに比較する。	サイト特性	P.153～156
1.3.3	水平アレー地震観測記録(地表)(到来方向別)を用いた検討	敷地の地震基盤以浅を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、水平アレー地震観測点(地表)間の応答スペクトル比を地震波の到来方向ごとに比較する。	⑤地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地	地震基盤以浅(地震基盤～解放基盤表面)	⑩水平アレー地震観測	観測点間の応答スペクトル比を確認し、地震波の到来方向ごとに比較する。	サイト特性	P.157～162
1.3.4	水平アレー地震観測記録(地中)(到来方向別)を用いた検討	敷地の地震基盤～EL-200mを対象に特異な速度構造の有無を確認するため、EL-200mの地震観測点間の応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋EL-200m)を地震波の到来方向ごとに比較する。	⑤地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地	地震基盤以浅(地震基盤～EL-200m)	⑩水平アレー地震観測	観測点間の応答スペクトル比を確認し、地震波の到来方向ごとに比較する。	サイト特性	P.163～166
1.3.5	原子炉建屋基礎版上の地震観測記録を用いた検討	敷地の地震基盤以浅を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、1号原子炉建屋基礎版上及び2号原子炉建屋基礎版上での加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを比較する。	⑤地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性の把握	敷地	地震基盤以浅(地震基盤～原子炉建屋基礎版)	⑪原子炉建屋基礎版上地震観測	原子炉建屋基礎版上における加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを1号と2号で比較する。	サイト特性	P.167～176

1.3 観測記録による地下構造の検討

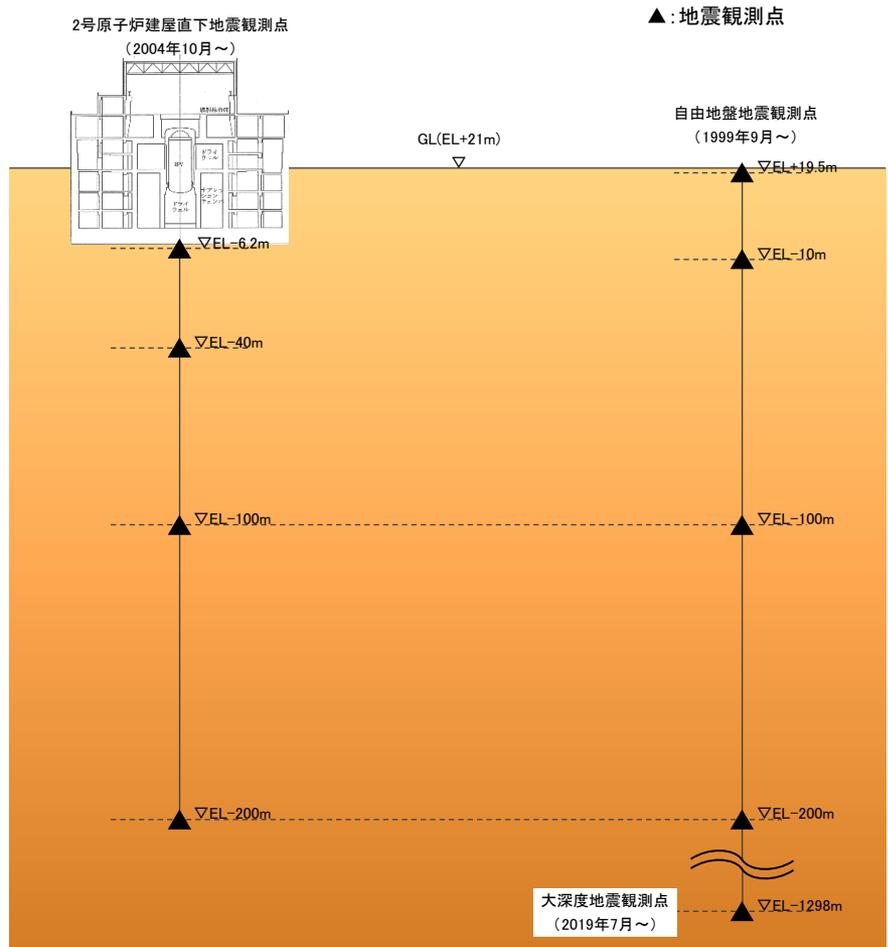
敷地地盤における主な地震観測点

- 敷地地盤における主な地震観測点の位置を下記に示す。
- 鉛直アレー地震観測点については、自由地盤地震観測点において、1999年9月よりEL+19.5m～EL-200mで観測を実施しており、2019年7月よりその深部の大深度地震観測点(EL-1298m)で観測を実施している。また、2号原子炉建屋直下地震観測点において、2004年10月よりEL-6.2m～EL-200mで観測を実施している。
- 水平アレー地震観測点については、敷地地盤の地表4地点において、2016年1月～2018年2月に観測を実施し、2020年10月より観測を再開している。



●：鉛直アレー地震観測点
●：水平アレー地震観測点(地表)

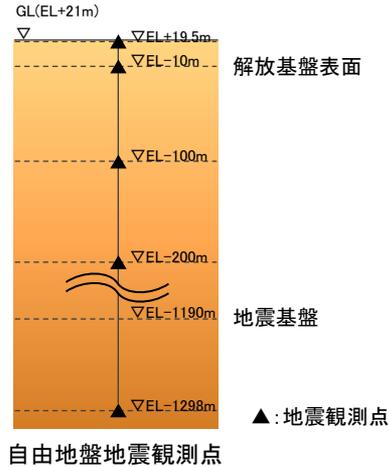
敷地地盤における主な地震観測点配置図



鉛直アレー地震観測点断面図

(1) 検討方針

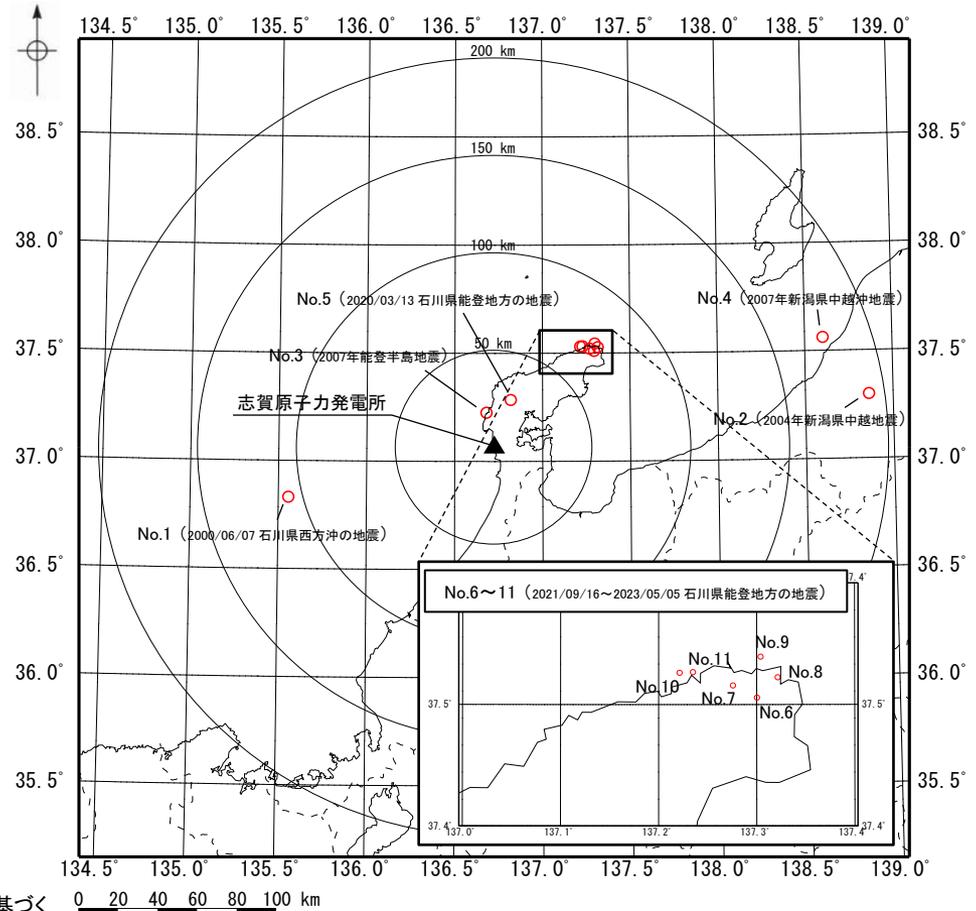
- 敷地地盤の増幅特性(地震基盤～解放基盤表面)を把握するため、自由地盤地震観測点における深度別(EL+19.5m, EL-10m, EL-100m, EL-200m, EL-1,298m)の応答スペクトルより増幅傾向を確認する。
- 検討に用いた主な観測地震(No.1～No.11)を以下に示す。No.1～4の地震は、2014年の設置変更許可申請書に記載している主な観測地震で、No.5～11の地震は、EL-1298mの大深度地震観測を開始した2019年7月以降に観測された主な観測地震(敷地から100km以内において発生したM5以上の地震)である。



主な観測地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2000/06/07	06:16	36.8265	135.5630	21.30	6.2	106.9
2	2004/10/23	17:56	37.2925	138.8672	13.08	6.8	191.8
3	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1
4	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8
5	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
6	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
7	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
8	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
9	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
10	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
11	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

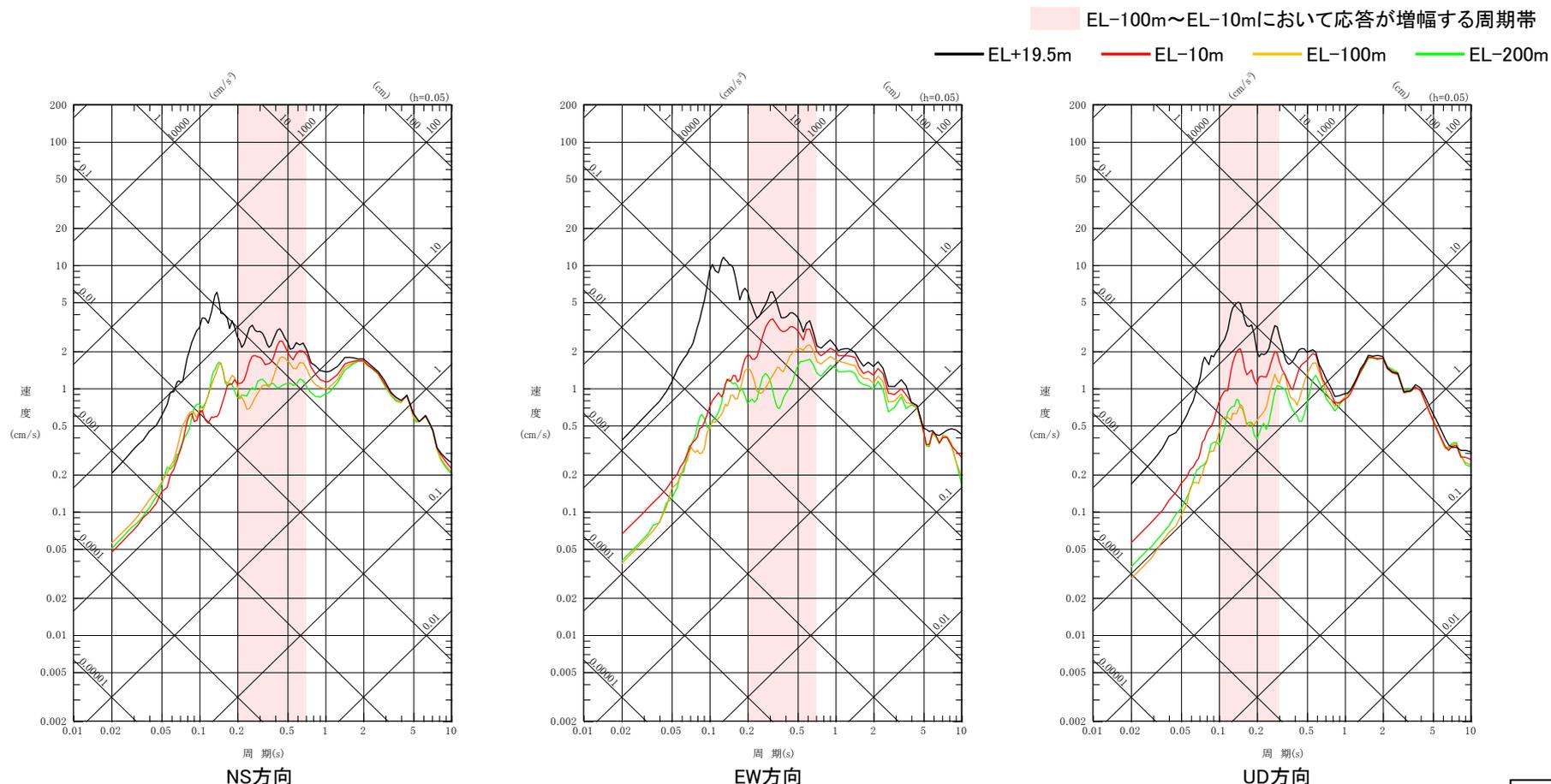
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



主な観測地震の震央分布図

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (1/11)

- 敷地地盤の増幅特性を把握するため、自由地盤地震観測点における主な観測地震(No.1~No.11)について、深度別の応答スペクトルを以降に示す。
- EL-1298mの大深度地震観測は、2019年7月より開始しているため、No.1~4の地震については、EL+19.5m, EL-10m, EL-100m, EL-200mの結果のみを示す。
- No.1(2000/06/07 石川県西方沖の地震)については、NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側、並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では、表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが、岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また、NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度、並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では、EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にある。



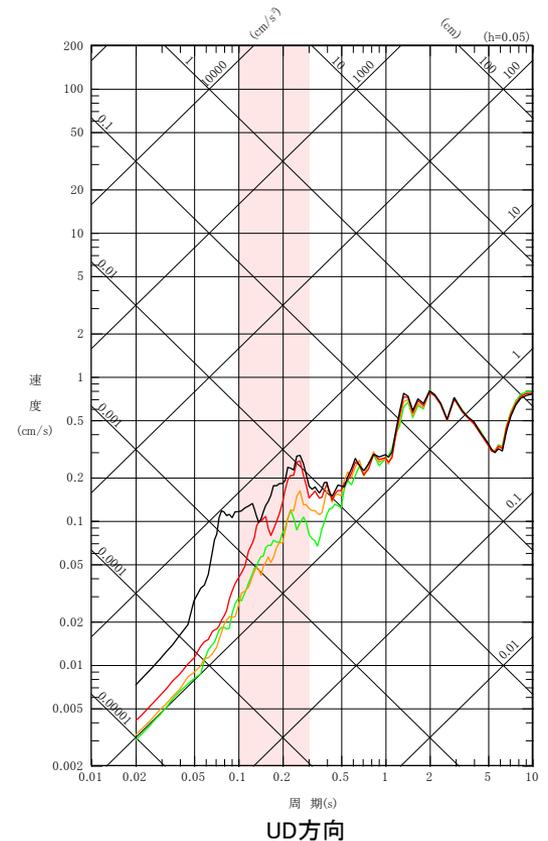
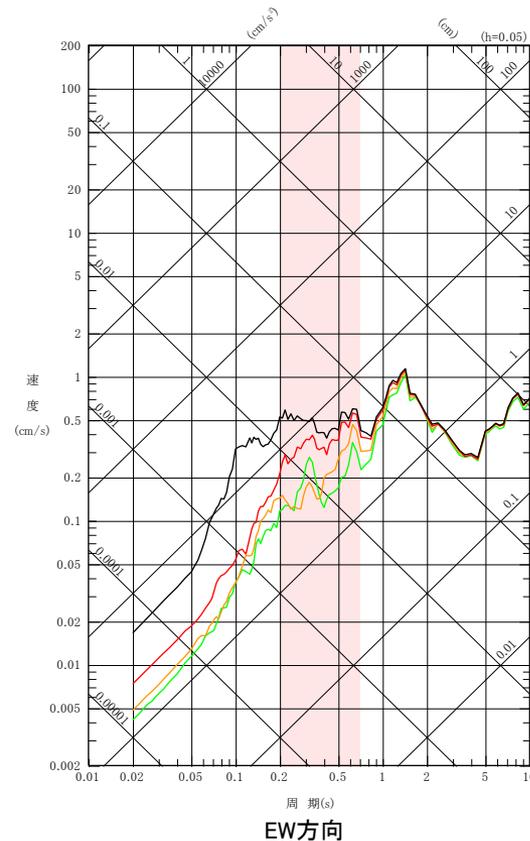
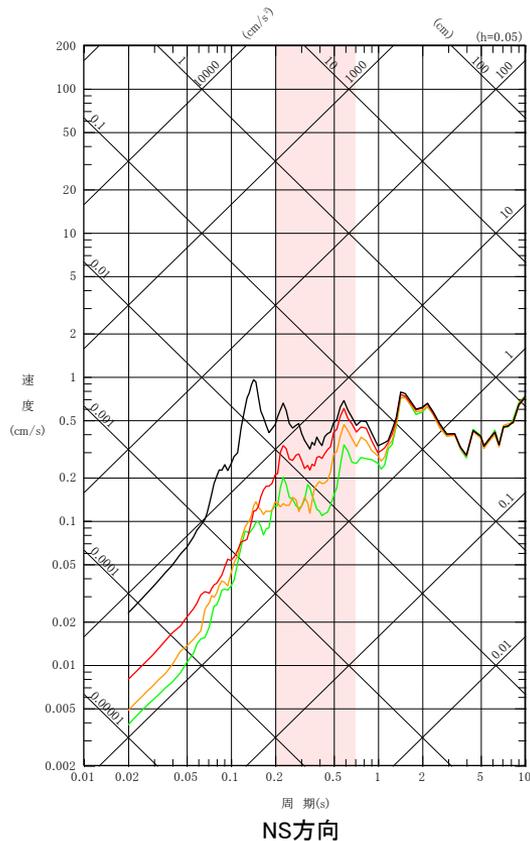
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.1(2000/06/07 石川県西方沖の地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (2/11)

○ No.2(2004年新潟県中越地震)についても, No.1の地震と同様, NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側, 並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また, NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度, 並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では, EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m



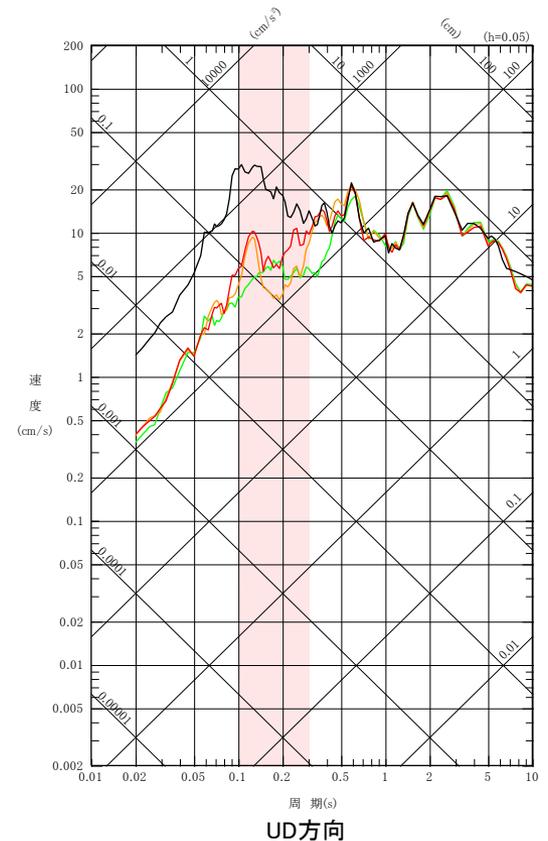
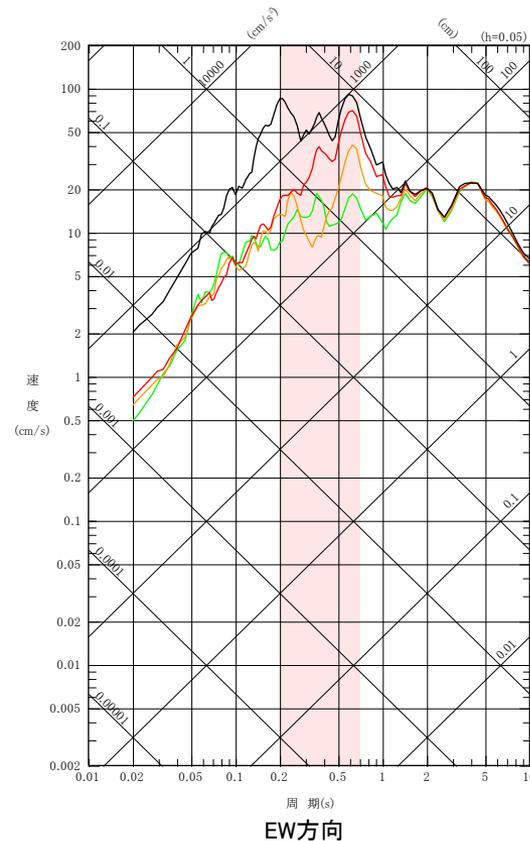
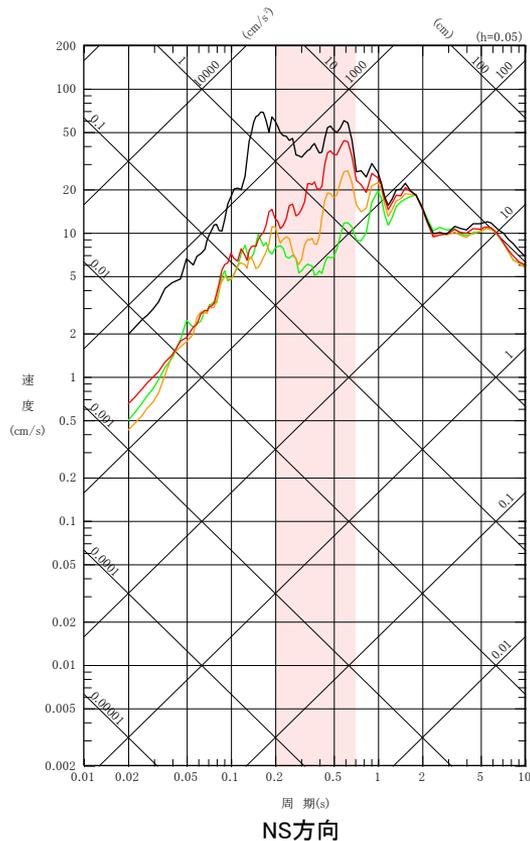
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.2(2004年新潟県中越地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (3/11)

○ No.3(2007年能登半島地震)についても, No.1の地震と同様, NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側, 並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また, NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度, 並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では, EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m



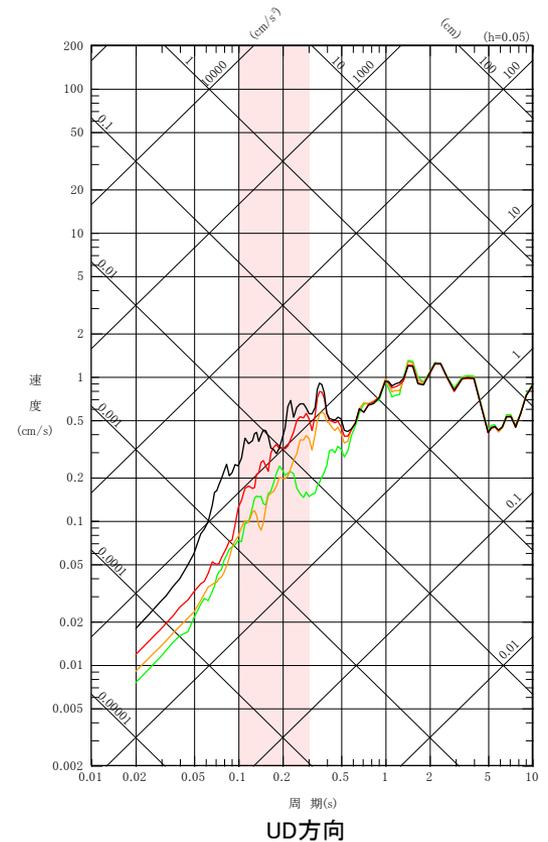
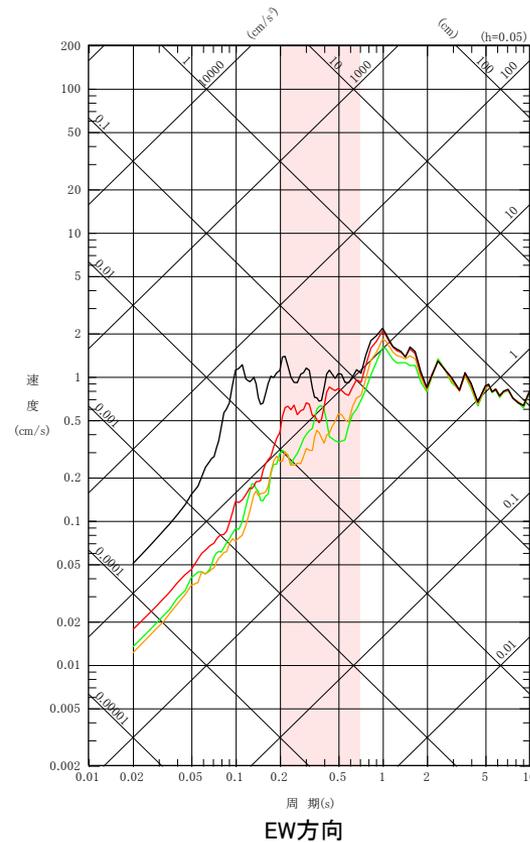
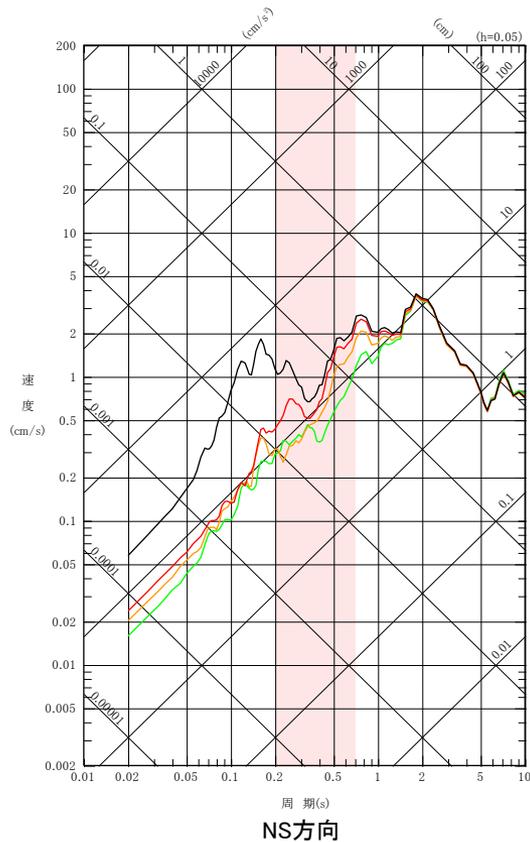
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.3(2007年能登半島地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (4/11)

○ No.4(2007年新潟県中越沖地震)についても, No.1の地震と同様, NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側, 並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-200m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また, NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度, 並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では, EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m



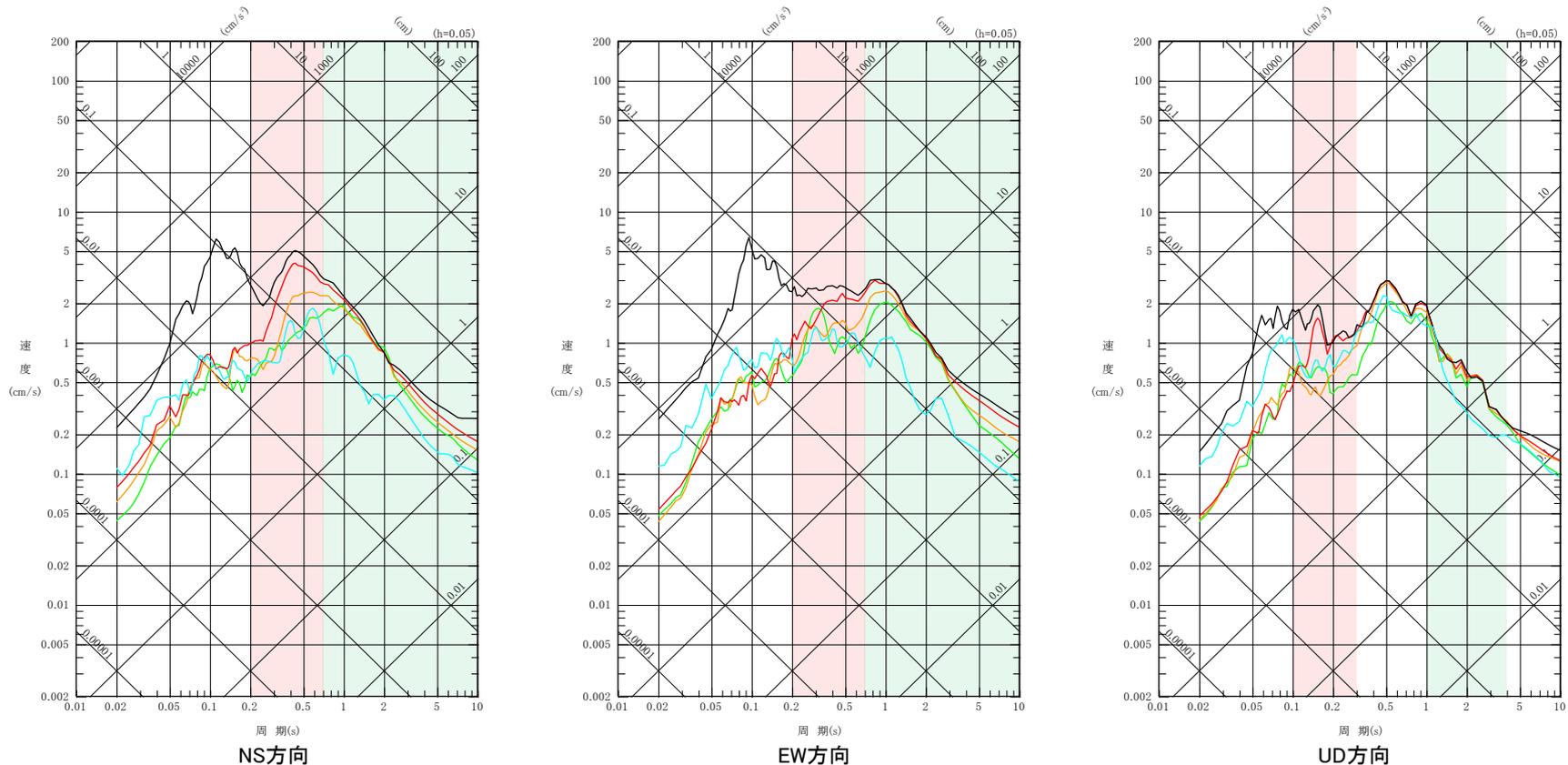
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.4(2007年新潟県中越沖地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (5/11)

○ No.5(2020/03/13 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側, 並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また, NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度, 並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では, EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にあり, NS方向及びEW方向の周期0.7秒程度より長周期側, 並びにUD方向の周期1~4秒程度では, EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯
EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m — EL-1298m



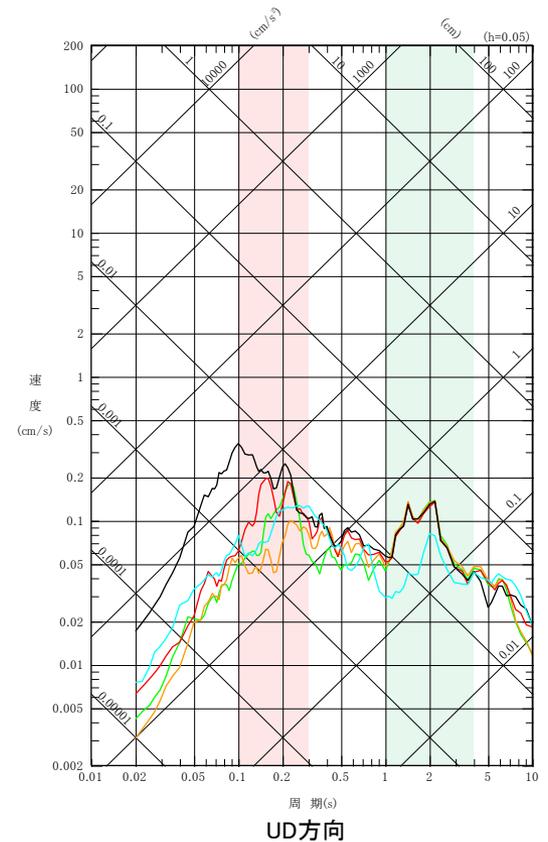
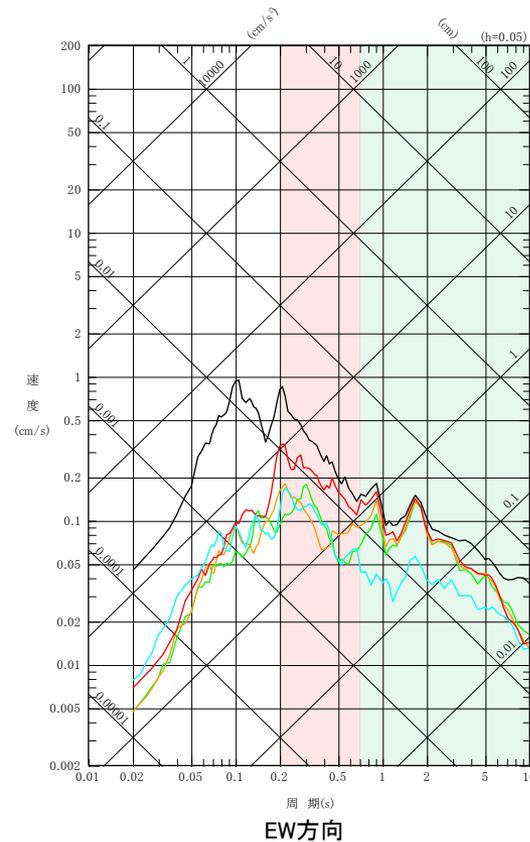
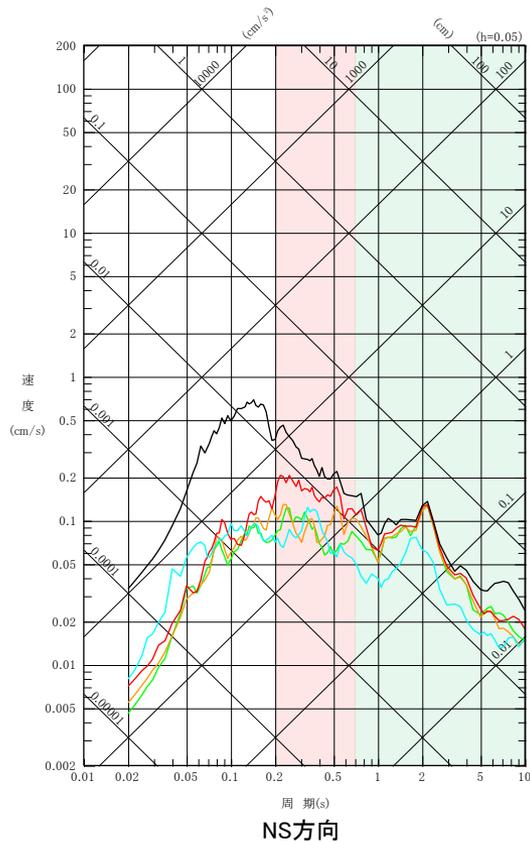
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.5(2020/03/13 石川県能登地方の地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (6/11)

○ No.6(2021/09/16 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側, 並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また, NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度, 並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では, EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にあり, NS方向及びEW方向の周期0.7秒程度より長周期側, 並びにUD方向の周期1~4秒程度では, EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯
EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m — EL-1298m



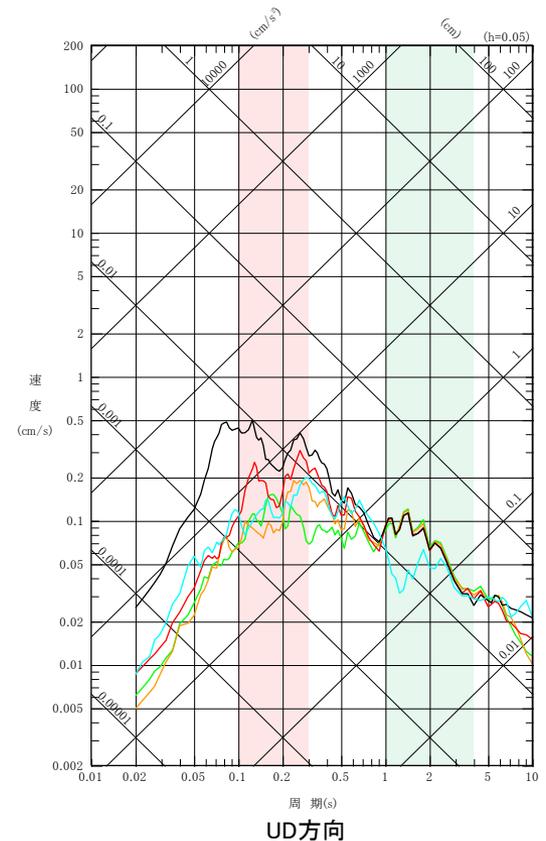
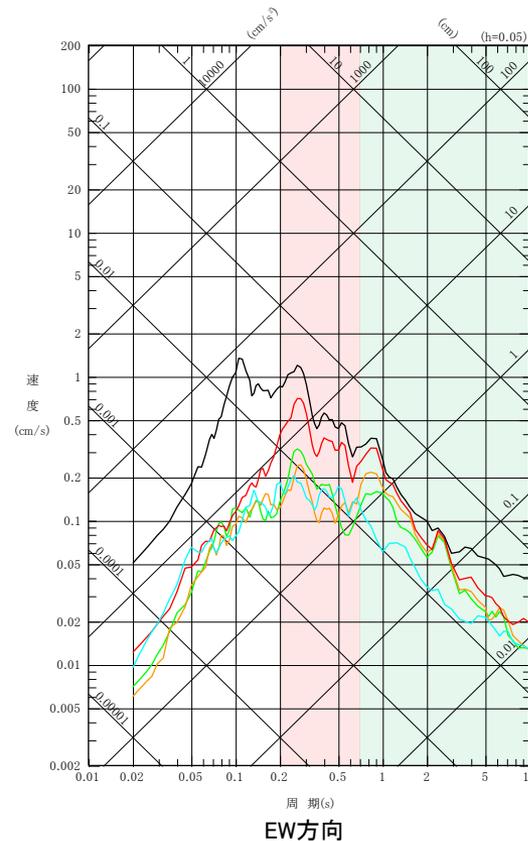
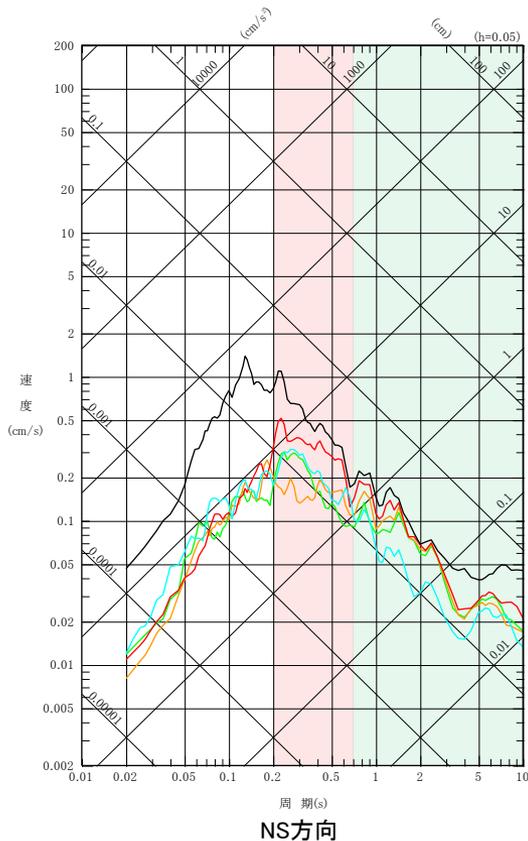
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.6(2021/09/16 石川県能登地方の地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (8/11)

○ No.8(2022/06/20 石川県能登地方の地震)についても, No.1の地震と同様, NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側, 並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では, 表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが, 岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また, NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度, 並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では, EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にあり, NS方向及びEW方向の周期0.7秒程度より長周期側, 並びにUD方向の周期1~4秒程度では, EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯
EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m — EL-1298m



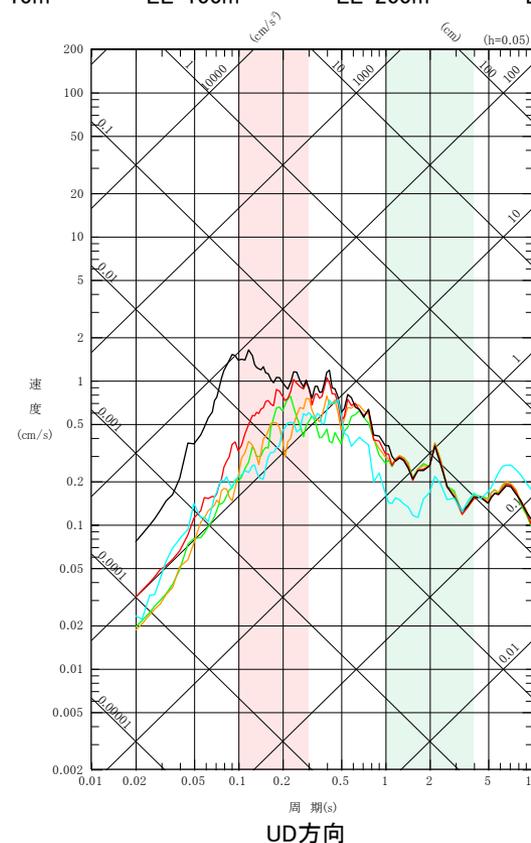
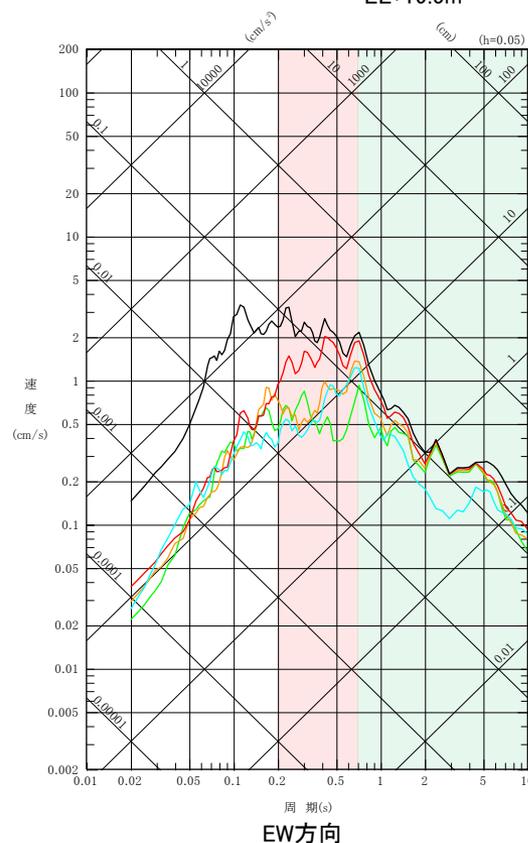
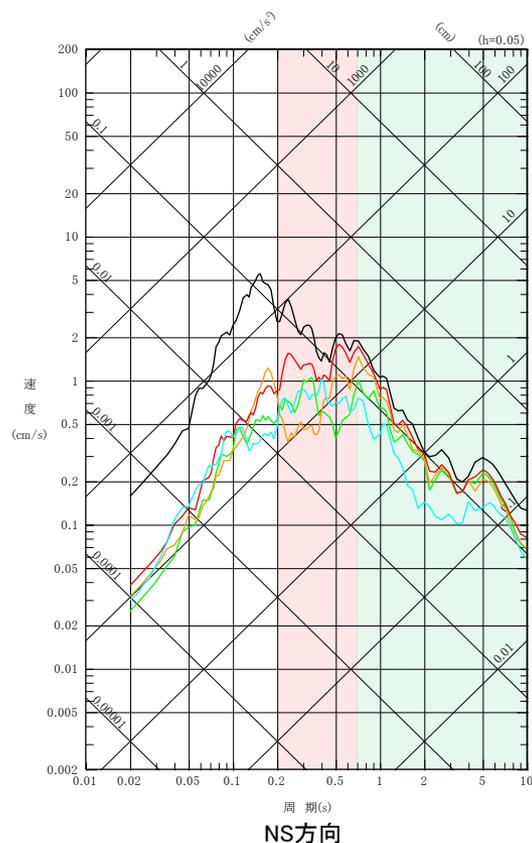
深度別の擬似速度応答スペクトル(No.8(2022/06/20 石川県能登地方の地震))

(2) 自由地盤地震観測点における主な観測地震 - 深度別の応答スペクトル - (11/11)

- No.11(2023/05/05 21:58 石川県能登地方の地震)についても、No.1の地震と同様、NS方向及びEW方向の周期0.2秒程度より短周期側、並びにUD方向の周期0.1秒程度より短周期側では、表層地盤(EL-10m~EL+19.5m)において応答が大きく増幅する傾向にあるが、岩盤中(EL-1298m~EL-10m)においてはほとんど増幅がみられない。また、NS方向及びEW方向の周期0.2~0.7秒程度、並びにUD方向の周期0.1~0.3秒程度では、EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する傾向にあり、NS方向及びEW方向の周期0.7秒程度より長周期側、並びにUD方向の周期1~4秒程度では、EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する傾向にある。

EL-100m~EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯

EL-1298m~EL-200mにおいて応答が増幅する周期帯

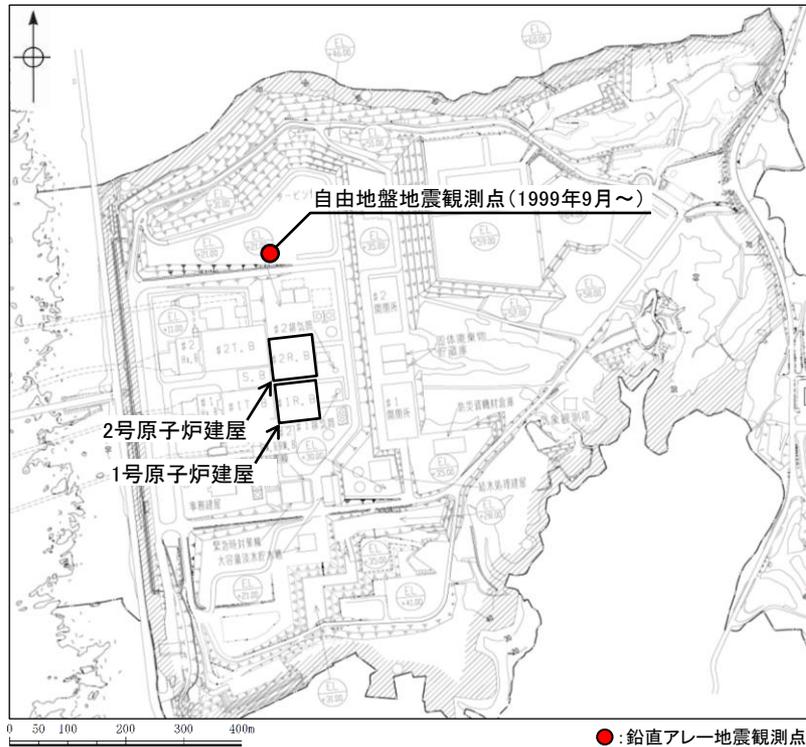


深度別の擬似速度応答スペクトル(No.11(2023/05/05 21:58 石川県能登地方の地震))

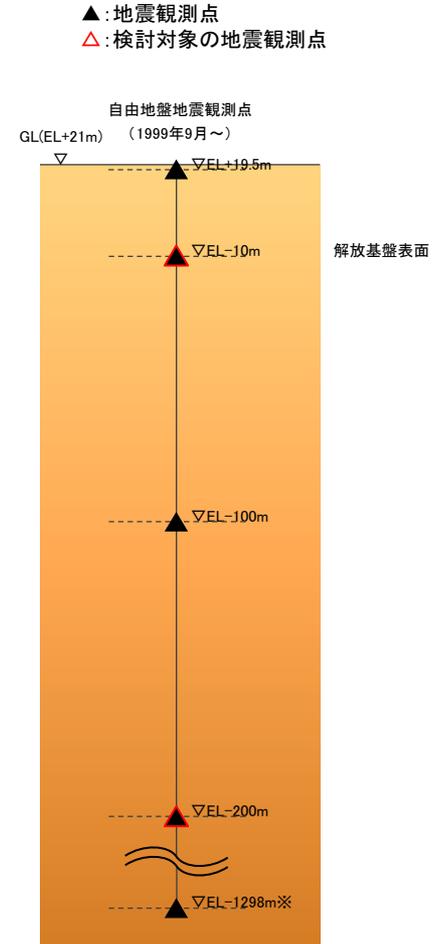
- No.1~No.11のいずれの地震についても、増幅傾向がみられる周期帯に顕著な違いはないことから、これらの増幅は敷地地盤固有の振動特性によるものと考えられる。なお、地下構造モデルの設定にあたっては、この振動特性が地下構造モデルに適切に反映されていることを確認する。(確認した結果はP.192参照)

(1) 検討方法

- 敷地のEL-200m～解放基盤表面を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、自由地盤地震観測点における応答スペクトル比(EL-10m/EL-200m)を地震波の到来方向ごとに比較する。



検討対象の地震観測点配置図



※ 大深度地震計については、2019年7月より観測を開始していることから、地震数が十分でないため検討対象としていない。

鉛直アレー地震観測点断面図

(2) 検討の対象とした地震 - 地震の諸元 -

○ 検討の対象とした地震の諸元を下表に示す。検討の対象は、1999年9月～2023年5月に自由地盤EL-200mと自由地盤EL-10mで同時に観測された地震のうち、2地点のNS成分、EW成分、UD成分の最大加速度が全て1cm/s²以上を記録し、観測記録の信頼周期上限が5秒程度以上である83地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
1	2000/06/07	06:16	36.8265	135.5630	21.30	6.2	106.9	西
2	2001/01/22	09:43	37.1975	136.7928	17.69	3.7	16.3	北
3	2004/10/23	18:34	37.3063	138.9300	14.17	6.5	197.5	東
4	2006/03/26	09:44	37.0180	136.8908	12.85	3.9	15.4	東
5	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1	北
6	2007/03/25	10:10	37.2540	136.6867	5.95	3.6	21.7	北
7	2007/03/25	10:16	37.2300	136.6573	5.41	4.1	19.8	北
8	2007/03/25	10:21	37.1768	136.6190	8.56	3.5	16	北
9	2007/03/25	10:36	37.1972	136.6995	11.20	4.1	15.3	北
10	2007/03/25	11:19	37.2670	136.7007	6.84	4.2	23	北
11	2007/03/25	11:25	37.1993	136.7040	12.02	3.3	15.5	北
12	2007/03/25	11:43	37.2165	136.6927	8.55	3.6	17.5	北
13	2007/03/25	12:24	37.1995	136.7205	11.98	3.7	15.4	北
14	2007/03/25	13:02	37.2082	136.7180	12.48	3.9	16.4	北
15	2007/03/25	13:56	37.2143	136.6877	10.17	3.5	17.4	北
16	2007/03/25	14:08	37.2065	136.7062	12.50	3.5	16.3	北
17	2007/03/25	14:55	37.1660	136.6953	10.37	3.8	12	北
18	2007/03/25	15:43	37.2940	136.7718	8.90	4.5	26.2	北
19	2007/03/25	15:57	37.2288	136.7337	11.42	3.8	18.7	北
20	2007/03/25	16:53	37.2203	136.6657	7.72	3.7	18.5	北
21	2007/03/25	17:08	37.1823	136.6767	10.31	3.4	14.2	北
22	2007/03/25	17:54	37.2437	136.7302	9.91	3.8	20.3	北
23	2007/03/25	18:11	37.3043	136.8395	13.45	5.3	28.8	北
24	2007/03/25	19:02	37.1868	136.6477	10.69	3.5	15.6	北
25	2007/03/26	02:14	37.1578	136.6695	11.96	4.2	11.9	北
26	2007/03/26	02:25	37.1838	136.5938	6.95	3.7	18.1	北
27	2007/03/26	02:34	37.2102	136.7128	11.98	3.5	16.6	北
28	2007/03/26	03:21	37.2345	136.7445	11.13	3.6	19.3	北
29	2007/03/26	07:16	37.1668	136.4893	0.00	5.3	24.2	西
30	2007/03/26	11:58	37.2183	136.7320	13.58	3.6	17.5	北
31	2007/03/26	13:47	37.2703	136.6570	4.30	4.4	24.1	北
32	2007/03/26	14:46	37.1653	136.5518	8.62	4.8	19.4	西
33	2007/03/26	18:02	37.2762	136.7007	5.91	4.6	24	北
34	2007/03/26	18:26	37.1935	136.6602	10.03	3.6	15.9	北
35	2007/03/26	21:30	37.1863	136.6473	9.55	3.9	15.6	北
36	2007/03/27	11:33	37.2267	136.6793	7.43	3.8	18.9	北
37	2007/03/28	00:57	37.2510	136.7215	9.89	4	21.1	北
38	2007/03/28	08:08	37.2223	136.7088	13.29	4.9	18	北
39	2007/03/28	10:51	37.1757	136.6118	10.18	4.6	16.3	北
40	2007/03/28	13:05	37.2820	136.6832	6.79	4.7	24.9	北
41	2007/03/28	21:16	37.1903	136.5823	6.10	3.8	19.3	北
42	2007/03/29	03:17	37.1610	136.6705	10.55	3.2	12.2	北
43	2007/03/29	10:46	37.2297	136.6888	8.31	3.8	19	北
44	2007/03/29	15:34	37.1782	136.6275	10.83	3.5	15.7	北
45	2007/03/31	08:09	37.2347	136.7598	13.47	4.4	19.5	北
46	2007/04/02	02:51	37.2105	136.6898	12.41	4.2	16.9	北
47	2007/04/02	08:01	37.2073	136.6468	6.99	4.1	17.7	北
48	2007/04/11	22:11	37.0742	136.4268	8.20	4.3	26.7	西
49	2007/04/26	11:30	37.2342	136.7443	10.90	3.9	19.3	北
50	2007/05/02	20:44	37.3307	136.7628	6.59	4.7	30.1	北

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
51	2007/05/11	02:12	37.1185	136.3117	10.56	4.5	37.4	西
52	2007/06/08	03:17	37.2245	136.6762	7.75	3.4	18.7	北
53	2007/06/11	03:45	37.2442	136.6547	7.29	5	21.3	北
54	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6	21	南
55	2007/07/09	16:00	37.3243	136.7580	10.04	4.2	29.4	北
56	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8	東
57	2007/08/16	18:52	37.0703	136.7162	2.50	0.7	1.4	北
58	2007/09/20	20:05	37.1485	136.4970	8.94	3.9	22.6	西
59	2007/12/18	02:53	37.2365	136.7477	9.22	3.9	19.6	北
60	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8	28.9	北
61	2008/04/29	06:58	37.2325	136.7308	10.91	3.8	19.1	北
62	2008/05/02	05:46	37.2347	136.6207	3.78	4	21.5	北
63	2008/07/15	14:41	37.1470	136.5913	10.35	3.9	15.4	西
64	2008/07/27	10:53	37.0998	136.8142	2.08	3.2	8.9	東
65	2009/05/23	05:15	37.1438	136.5355	10.91	3.9	19.3	西
66	2012/11/16	15:57	37.1613	136.5583	9.50	3.6	18.7	西
67	2013/04/04	01:58	36.7340	136.7850	12.93	4.2	36.6	南
68	2014/09/27	00:35	37.2377	136.6780	8.30	4.1	20.1	北
69	2015/02/01	00:42	37.2618	137.1442	14.84	4.4	43.3	東
70	2015/04/21	05:15	36.9450	136.7195	7.58	3.1	12.9	南
71	2018/01/05	11:02	36.8712	136.9803	13.65	4	30.9	東
72	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8	北
73	2020/04/06	05:00	37.2677	136.8118	12.05	4	24.2	北
74	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9	東
75	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1	北
76	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5	73.5	東
77	2023/01/06	13:44	37.5065	137.2743	13.42	4.5	69.3	北
78	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8	北
79	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5	67.7	北
80	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6	北
81	2023/05/09	05:14	37.5208	137.3103	14.52	4.7	72.7	東
82	2023/05/09	05:16	37.5262	137.3173	13.86	4.4	73.6	東
83	2023/05/10	07:14	37.6010	137.2857	12.64	4.9	77.8	北

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく

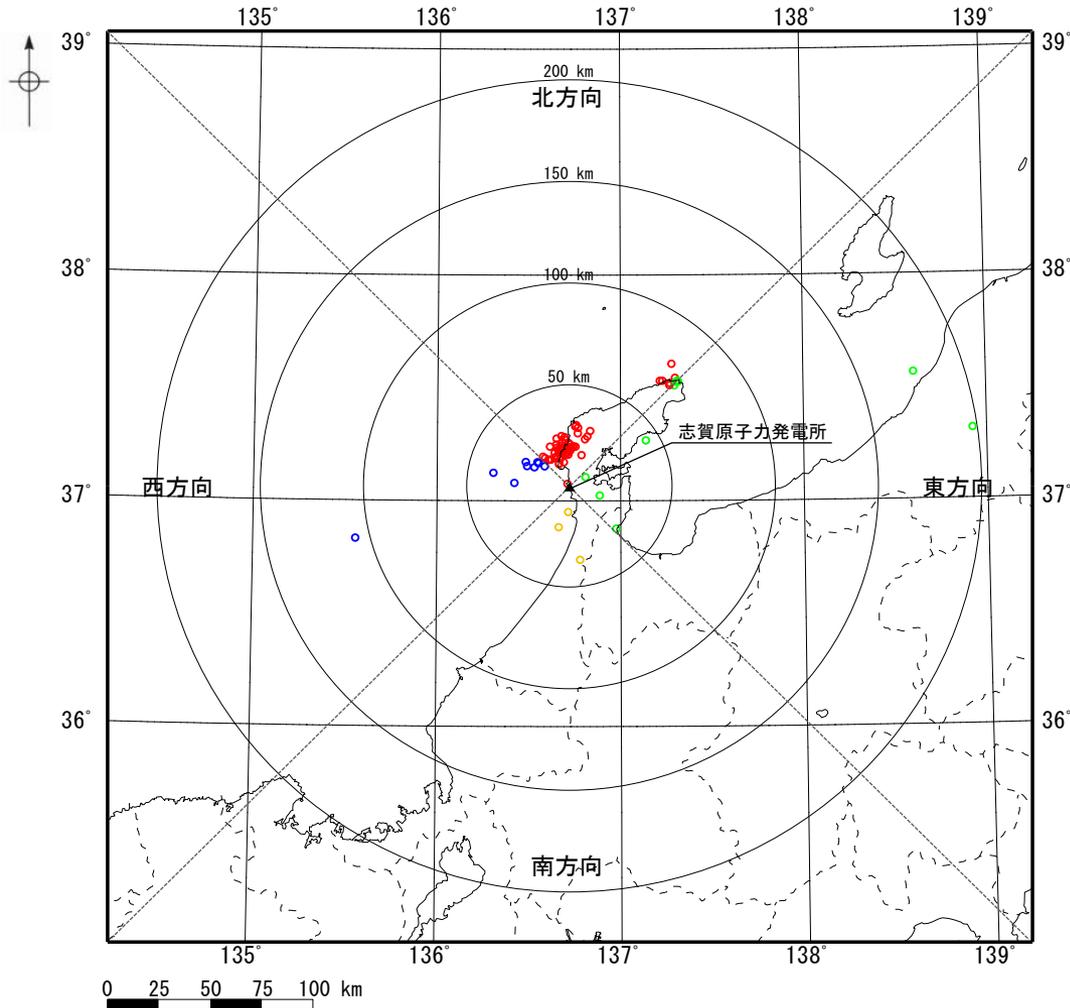
到来方向	地震数
東方向	10個
西方向	9個
南方向	3個
北方向	61個
全方向	83個

※ 震央の方位は志賀原子力発電所から震央位置を望む方位を示す。

※ 検討に用いた各地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルはデータ集P.328～411。

(2) 検討の対象とした地震 - 震央分布図 -

○ 検討の対象とした地震の震央分布図を下図に示す。

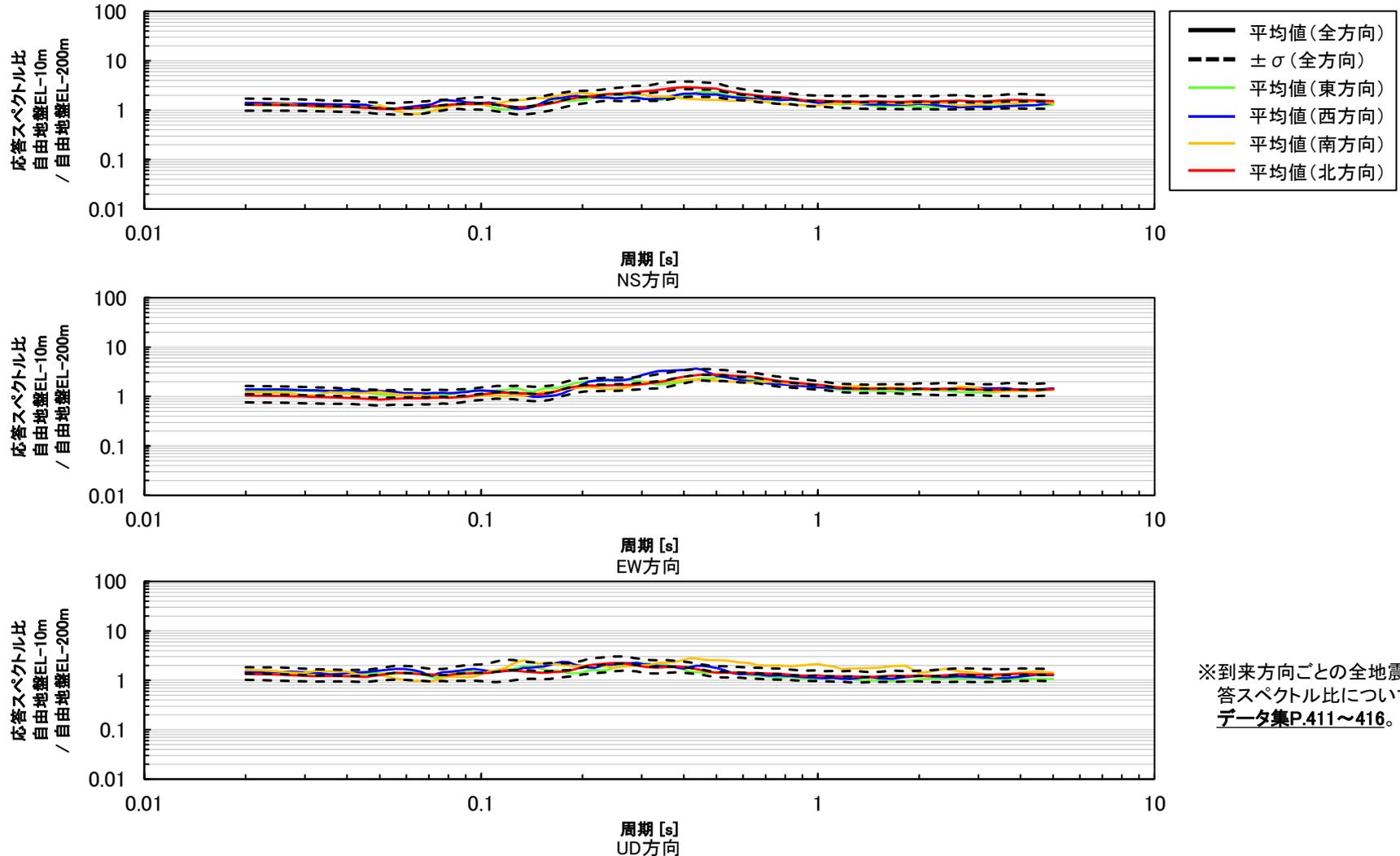


到来方向	地震数
東方向	10個
西方向	9個
南方向	3個
北方向	61個
全方向	83個

検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果

○ 自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比を地震波の到来方向ごとに比較した結果、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはない。



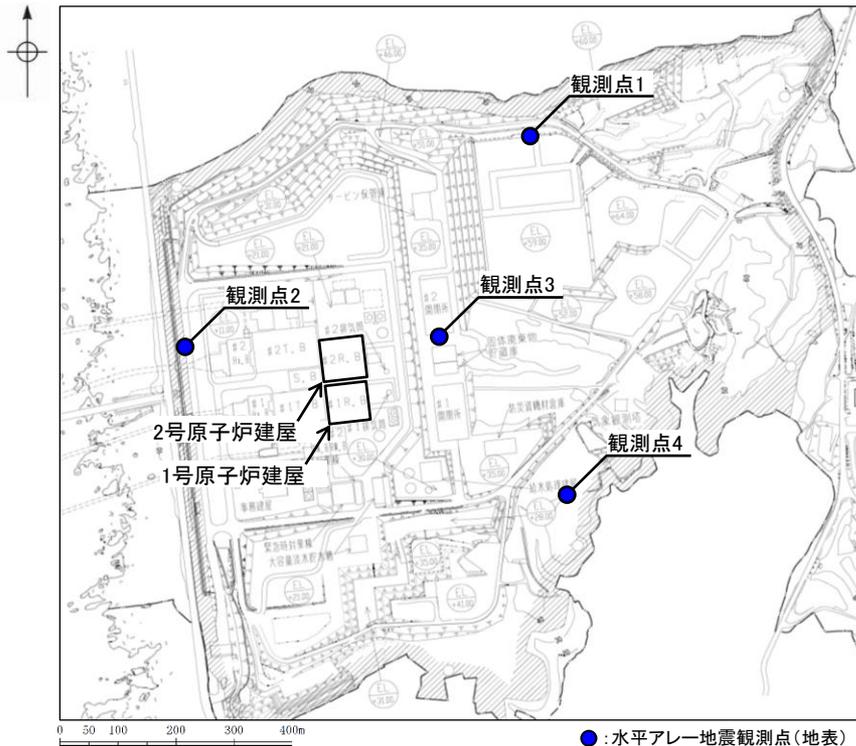
※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、**データ集P.411~416**。

応答スペクトル比(自由地盤EL-10m/自由地盤EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較

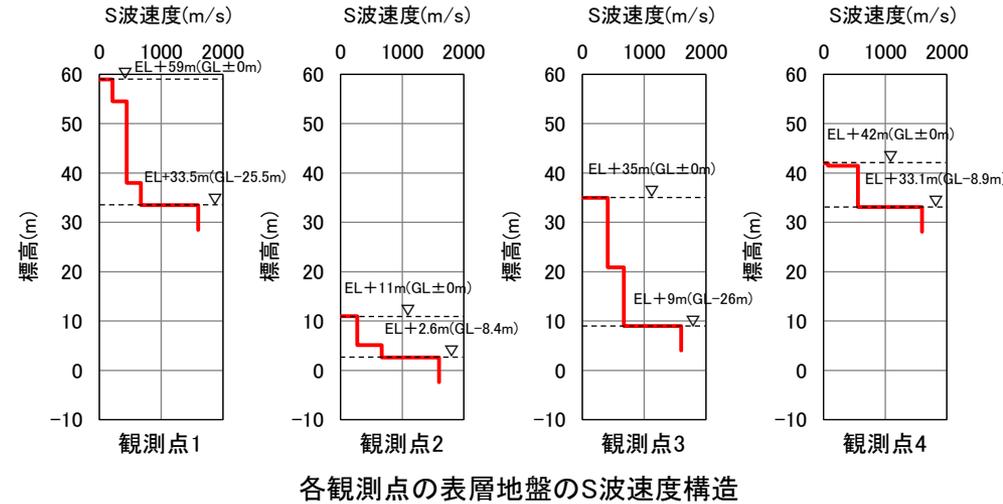
➤ 自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはないことから、自由地盤地震観測点周辺のEL-10m~EL-200mに、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

(1) 検討方法

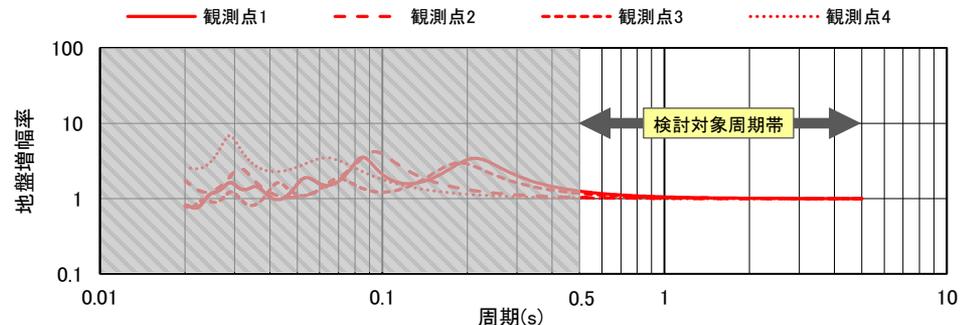
- 敷地の地震基盤以浅を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、水平アレー地震観測点(地表)間の応答スペクトル比(観測点4に対する観測点1~3の比)^{※1}を地震波の到来方向ごとに比較する。
- 各観測点付近の表層地盤のS波速度構造^{※2}と水平方向の地盤増幅率^{※3}を右下図に示す。
- 地盤増幅率をみると、周期0.5秒未満の短周期側では、各観測点の増幅特性が異なっており、応答スペクトル比にはS波速度1000m/s未満となる表層地盤の速度構造の違いによる影響が含まれると考えられることから、本検討では周期0.5秒以上の長周期側を対象とした、表層地盤より深部の速度構造について確認した。



水平アレー地震観測点配置図



各観測点の表層地盤のS波速度構造



各観測点の表層地盤の地盤増幅率(水平方向)

※1 地震基盤においては、観測点位置によらず同様の揺れであると考えられることから、観測点間の応答スペクトル比は、地震基盤が浅い速度構造の違いが反映されているものとする。なお、全観測点の中で最も振幅レベルが小さく、表層地盤が薄い観測点4を基準点とする。

※2 半径数m程度の三角形アレー等を複数配置した微動アレー探査により推定した。

※3 表層地盤のS波速度構造より、最下層に対する地表(GL±0m)の地盤増幅率を算定した。

(2)検討の対象とした地震 -地震の諸元-

○ 検討の対象とした地震の諸元を下表に示す。検討の対象は、2016年1月～2018年2月及び2020年10月～2023年2月に観測された地震のうち、SN 比が大きい78地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
1	2016/02/03	21:28	36.4062	137.6380	0.00	4.4	109.1	東
2	2016/03/07	05:58	35.8363	135.8663	12.59	3.9	156.2	南
3	2016/05/23	19:03	36.8070	137.8983	2.77	3.3	108.1	東
4	2016/06/23	12:59	35.7768	136.4485	8.81	3.4	144.7	南
5	2016/06/25	13:51	36.8182	137.8323	0.00	4.8	102.1	東
6	2016/06/27	03:28	36.8203	137.8392	0.00	3.4	102.6	東
7	2016/06/27	19:48	36.8172	137.8400	0.00	3.3	102.8	東
8	2016/06/27	20:11	36.8180	137.8370	0.00	2.9	102.5	東
9	2016/06/29	04:30	36.8158	137.8325	0.00	3.3	102.2	東
10	2016/07/01	08:04	36.8227	137.8457	0.00	4.6	103.1	東
11	2016/07/15	02:29	36.7330	135.2505	21.15	3.7	136.5	西
12	2016/08/20	08:14	37.2592	136.6910	8.17	3.9	22.2	北
13	2016/09/03	08:29	36.8362	137.8515	0.00	3.4	103.2	東
14	2016/09/26	04:01	38.2747	137.8308	30.89	4.0	166.3	北
15	2016/10/21	14:07	35.3805	133.8562	10.61	6.6	318.4	西
16	2016/11/15	01:46	37.3063	137.0903	8.68	2.8	42.2	東
17	2016/11/19	11:48	33.8427	135.4635	51.35	5.4	375.0	南
18	2016/12/06	09:05	36.0078	137.3443	5.11	4.5	129.3	南
19	2017/01/10	06:52	35.7957	136.9197	9.83	3.8	141.4	南
20	2017/01/17	15:53	36.5885	135.9817	21.79	3.6	84.6	西
21	2017/03/05	08:53	36.0072	137.3463	6.00	3.1	129.4	南
22	2017/04/01	19:43	37.3132	136.7688	5.11	3.6	28.3	北
23	2017/05/27	22:50	36.0662	135.5433	17.16	5.1	153.0	南
24	2017/06/25	07:02	35.8680	137.5865	6.66	5.6	153.2	南
25	2017/06/25	09:24	35.8635	137.5668	5.90	4.5	152.7	南
26	2017/06/25	15:17	35.8568	137.5843	6.60	4.7	154.1	南
27	2017/08/13	07:14	37.0970	136.8145	3.75	1.7	8.8	東
28	2017/09/08	12:42	37.2918	136.7457	7.11	3.6	25.7	北
29	2020/10/19	03:27	35.2118	136.6313	41.94	4.1	205.3	南
30	2020/11/29	17:15	36.4340	136.7155	8.65	2.5	69.6	南
31	2020/12/28	03:15	37.0360	136.4037	9.77	3.6	28.9	西
32	2021/02/13	23:07	37.7288	141.6985	55.38	7.3	446.4	東
33	2021/03/11	19:57	36.2198	137.6533	3.73	4.3	124.8	南
34	2021/07/17	18:07	36.3243	137.6155	2.57	4.3	114.0	南
35	2021/07/18	18:50	37.0382	139.2767	3.50	4.7	226.8	東
36	2021/07/24	15:11	38.0403	137.9325	18.18	3.7	152.2	北
37	2021/07/26	21:20	37.5027	137.2107	12.66	2.7	65.2	北
38	2021/07/27	17:31	36.0902	137.3172	10.42	3.2	120.0	南
39	2021/08/08	01:42	37.5112	137.2197	13.39	2.9	66.4	北
40	2021/08/14	22:38	37.5088	137.2230	13.50	4.2	66.4	北
41	2021/08/16	05:03	35.4510	136.3343	13.00	4.6	182.1	南
42	2021/08/16	08:17	35.4552	136.3303	13.33	4.4	181.7	南
43	2021/08/21	16:40	37.5163	137.2388	13.17	3.7	68.0	北
44	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9	東
45	2021/09/19	17:18	36.3455	137.6247	0.00	5.3	112.9	南
46	2021/09/19	17:19	36.3415	137.6198	0.99	4.9	112.9	南
47	2021/09/19	18:59	36.3033	137.6253	3.17	4.4	116.3	南
48	2021/09/19	19:04	36.2872	137.6323	4.02	4.7	118.0	南
49	2021/09/24	18:48	37.3658	138.4017	16.18	4.1	152.5	東
50	2021/09/27	19:54	36.2715	137.6327	4.37	4.3	119.3	南

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
51	2022/03/08	01:58	37.5248	137.2372	13.51	4.8	68.6	北
52	2022/03/16	23:36	37.6967	141.6230	56.61	7.4	439.3	東
53	2022/03/23	09:23	37.5150	137.2987	13.82	4.3	71.5	東
54	2022/04/04	10:26	37.5172	137.2262	13.92	4.3	67.3	北
55	2022/04/30	18:06	35.0463	135.5643	12.47	4.3	246.8	南
56	2022/05/02	14:52	37.5273	137.3017	12.45	4.1	72.7	北
57	2022/06/12	18:14	37.5120	137.2268	13.30	3.0	66.9	北
58	2022/06/16	02:27	37.5295	137.2363	12.84	4.0	68.9	北
59	2022/06/17	00:51	33.9123	134.5888	45.35	4.9	399.6	南
60	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1	北
61	2022/06/19	16:38	37.5152	137.2620	11.96	3.3	69.3	北
62	2022/06/19	19:22	37.5247	137.2740	11.28	3.2	70.8	北
63	2022/06/20	03:03	37.5252	137.2725	11.30	2.9	70.7	北
64	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5	東
65	2022/08/29	22:25	37.5197	137.2123	12.82	3.1	66.7	北
66	2022/09/07	17:48	36.5532	137.5975	3.71	3.3	96.0	東
67	2022/09/22	16:27	37.3168	137.8183	17.92	2.5	101.0	東
68	2022/10/13	11:56	37.5120	137.2170	11.38	3.1	66.3	北
69	2022/10/25	07:08	37.5217	137.2127	13.31	3.2	66.9	北
70	2022/11/14	22:27	37.5195	137.2597	11.92	4.2	69.5	北
71	2022/11/26	21:58	37.5358	137.2285	12.79	4.2	69.0	北
72	2022/12/05	02:47	37.5155	137.2237	13.78	3.2	67.0	北
73	2022/12/11	00:27	37.5260	137.2930	12.35	3.6	72.0	北
74	2022/12/11	02:22	37.5290	137.2922	12.09	3.0	72.2	北
75	2023/01/06	13:44	37.5065	137.2743	13.42	4.5	69.3	北
76	2023/01/06	23:53	37.4922	137.2168	12.45	3.9	64.7	北
77	2023/02/21	07:47	37.5098	137.2282	13.11	3.2	66.8	北
78	2023/02/21	22:53	37.5253	137.2735	11.51	4.1	70.8	北

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく

到来方向	地震数
東方向	20個
西方向	4個
南方向	24個
北方向	30個
全方向	78個

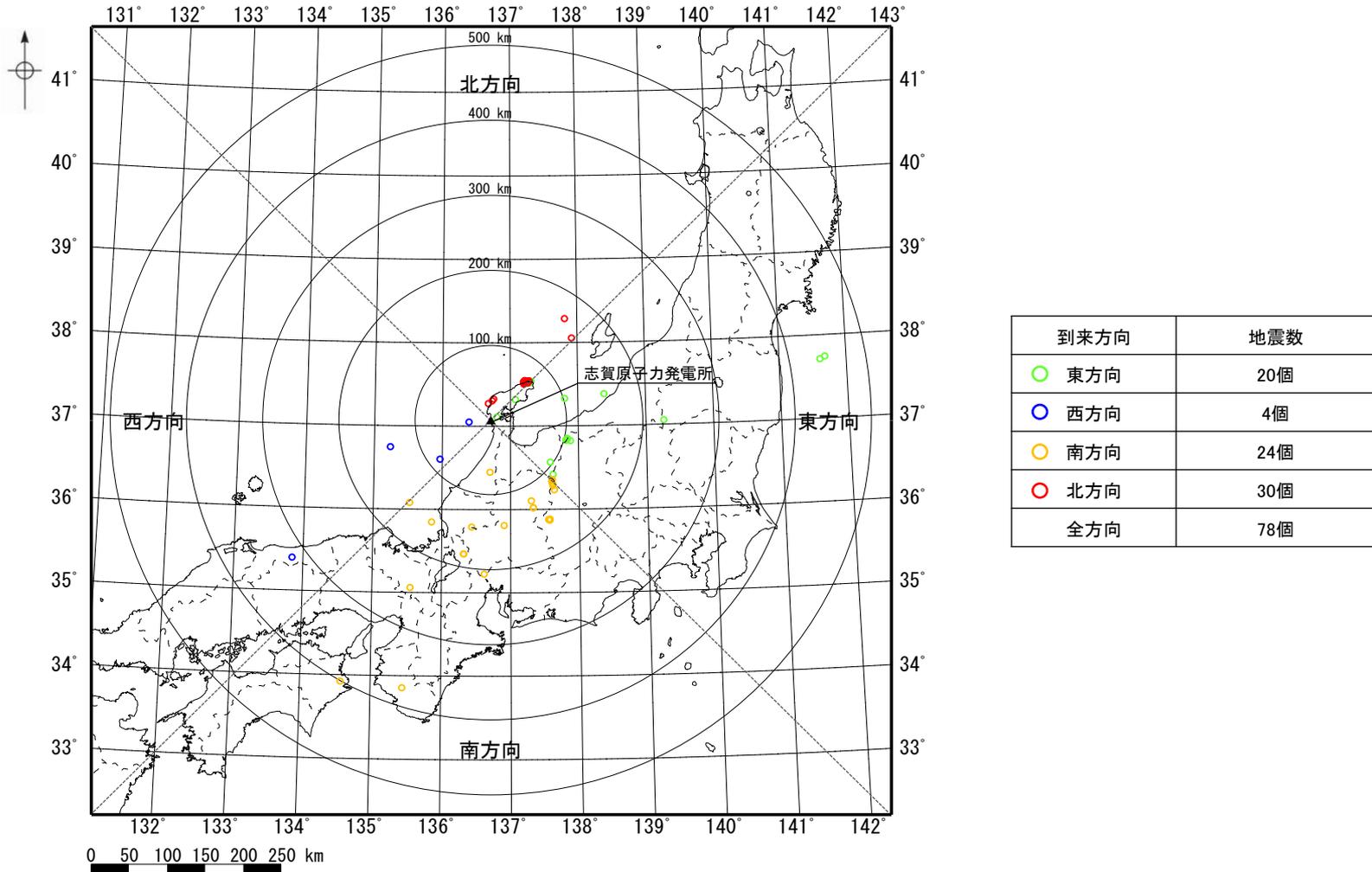
※ 観測点3のNS方向のNo.3～12及びEW方向のNo.29, 32～33, 43～48, 53～56については、地震計の不具合により適切な観測記録が得られなかったことから検討対象外とした。

※ 震央の方位は志賀原子力発電所から震央位置を望む方位を示す。

※ 検討に用いた各地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルはデータ集P.171～249。

(2) 検討の対象とした地震 - 震央分布図 -

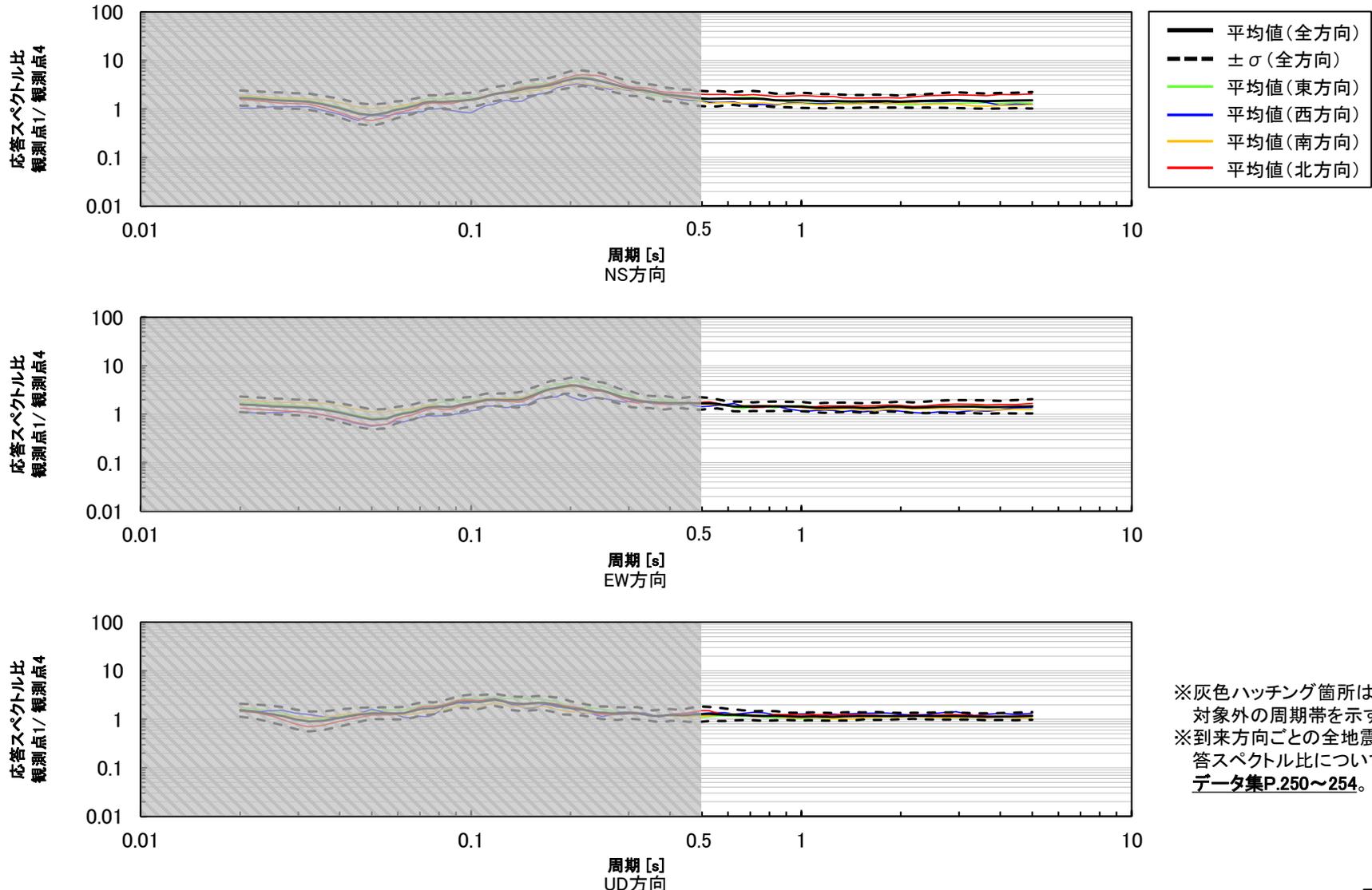
○ 検討の対象とした地震の震央分布図を下図に示す。



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果 - 観測点1/観測点4 -

○ 観測点4に対する観測点1の応答スペクトル比の平均値を地震波の到来方向ごとに比較した結果、検討対象とした周期帯(周期0.5秒以上)において、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。

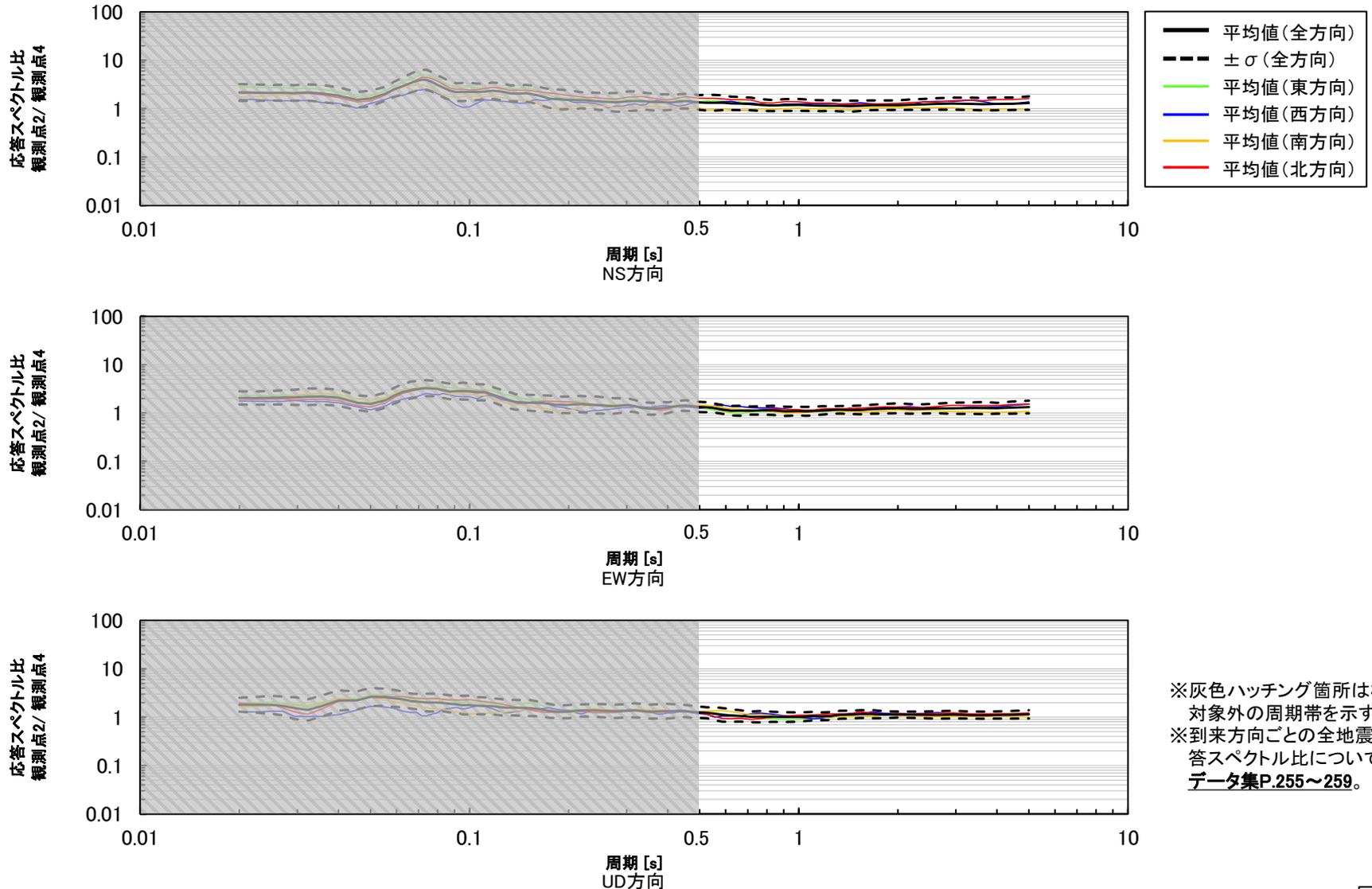


※灰色ハッチング箇所は検討対象外の周期帯を示す。
※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、データ集P.250~254。

応答スペクトル比(観測点1/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較

(3) 検討結果 一観測点2/観測点4一

○ 観測点4に対する観測点2の応答スペクトル比についても、観測点4に対する観測点1の応答スペクトル比と同様、検討対象とした周期帯(周期0.5秒以上)において、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。

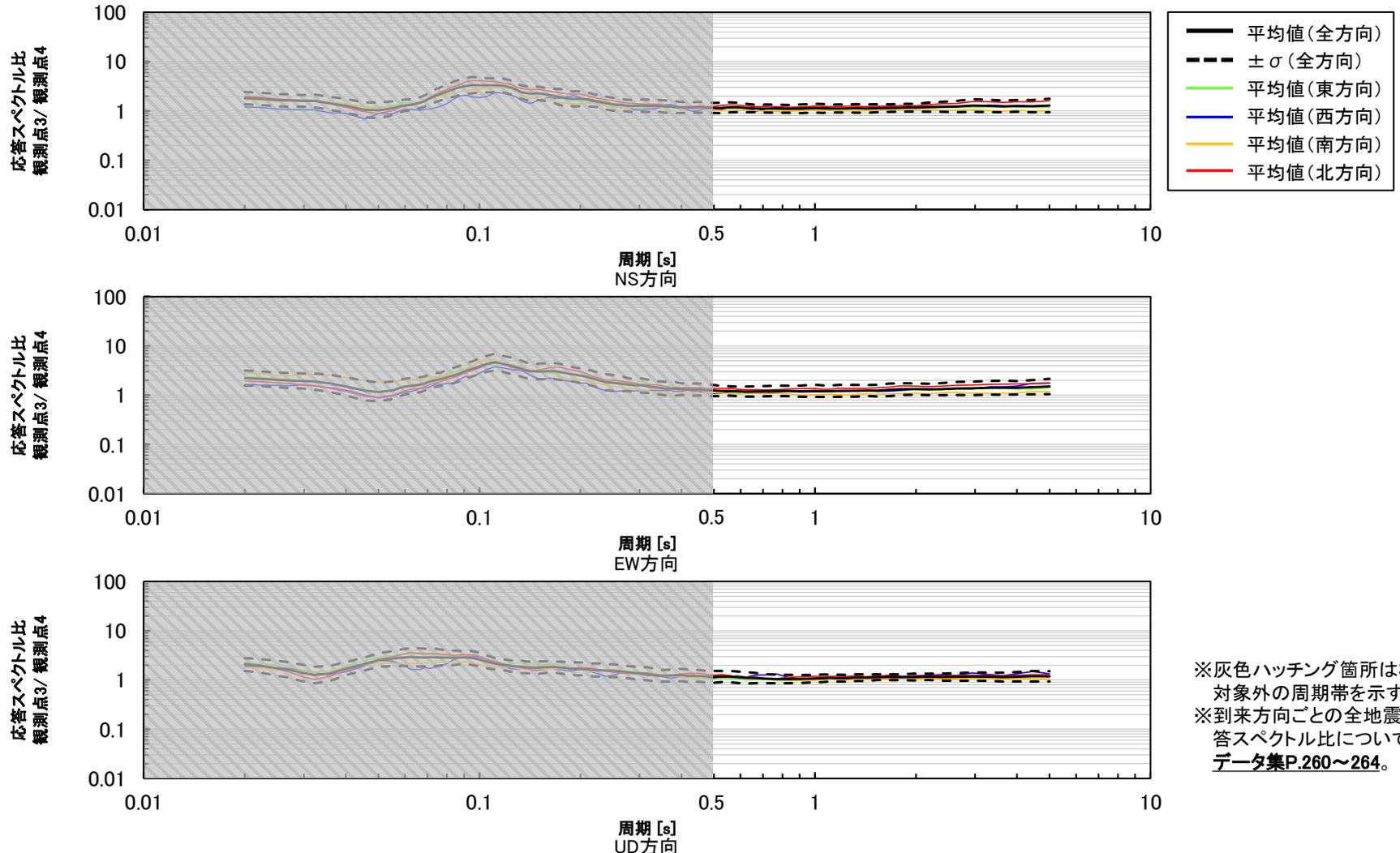


※灰色ハッチング箇所は検討対象外の周期帯を示す。
※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、データ集P.255~259。

応答スペクトル比(観測点2/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較

(3) 検討結果 — 観測点3/観測点4 —

○ 観測点4に対する観測点3の応答スペクトル比についても、観測点4に対する観測点1の応答スペクトル比と同様、検討対象とした周期帯(周期0.5秒以上)において、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。



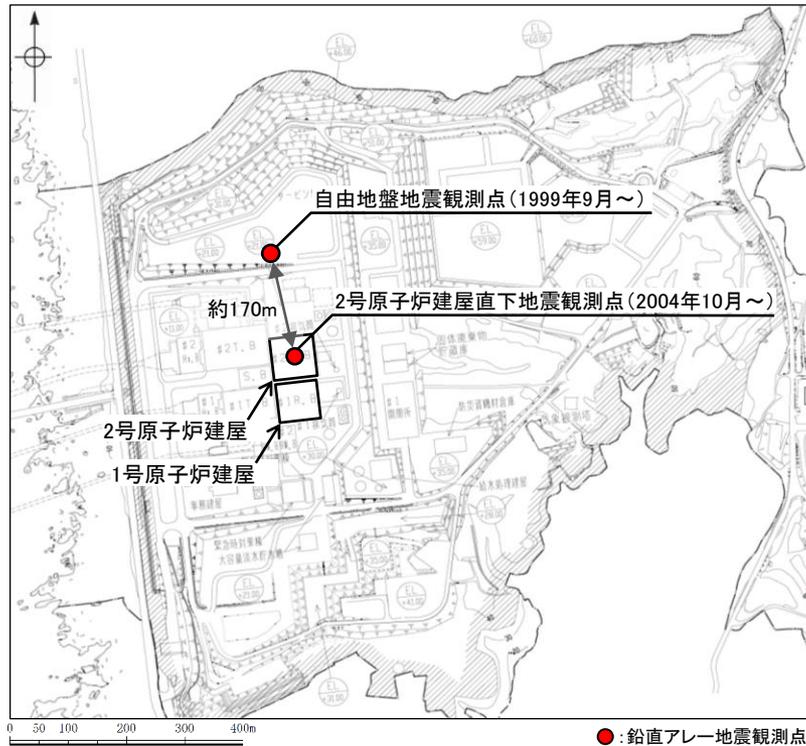
※灰色ハッチング箇所は検討対象外の周期帯を示す。
※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、データ集P.260～264。

応答スペクトル比(観測点3/観測点4)の地震波の到来方向ごとの比較

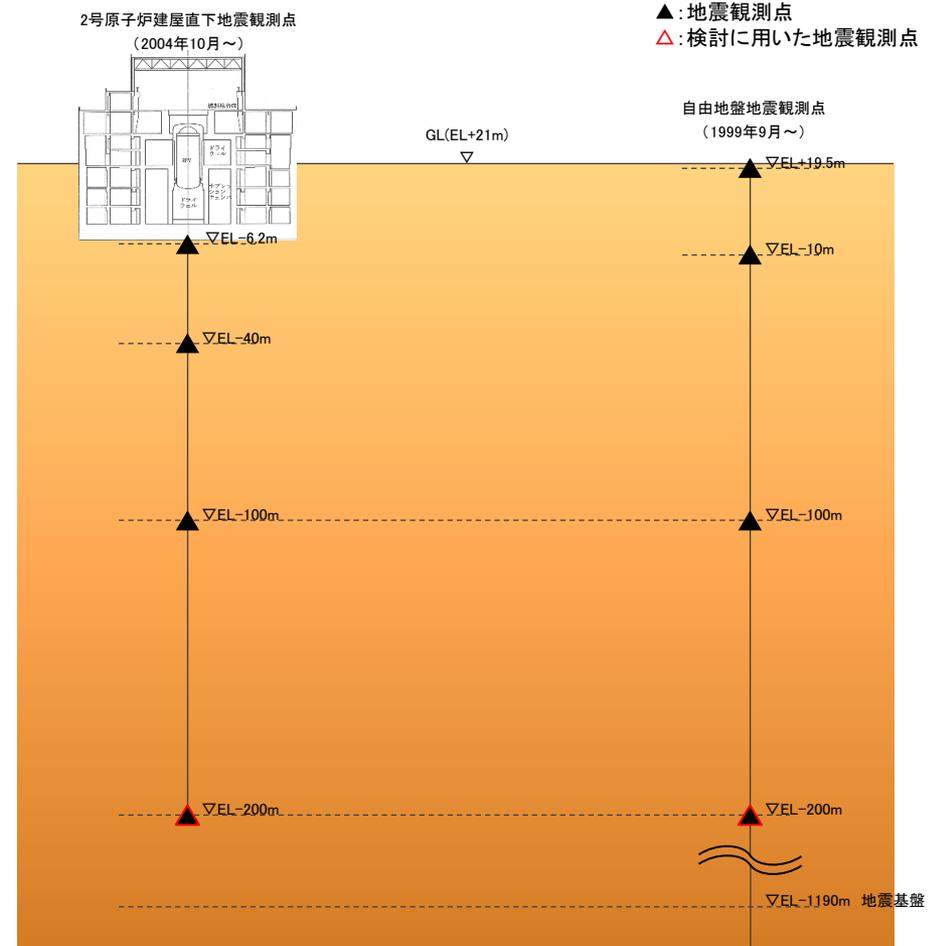
➤ 観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1～4周辺の地震基盤以浅(表層地盤を除く)に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

(1) 検討方法

- 敷地の地震基盤～EL-200mを対象に特異な速度構造の有無を確認するため、EL-200mの地震観測点間の応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋EL-200m)*を地震波の到来方向ごとに比較する。



検討対象の地震観測点配置図



鉛直アレー地震観測点断面図

* 地震基盤においては、観測点位置によらず同様の揺れであると考えられることから、観測点間の応答スペクトル比は、地震基盤以浅の速度構造の違いが反映されているものとする。

1.3.4 水平アレー地震観測記録(地中)(到来方向別)を用いた検討

(2)検討の対象とした地震 ー地震の諸元ー

○ 検討の対象とした地震の諸元を下表に示す。検討の対象は、2004年10月～2023年5月に2号原子炉建屋直下EL-200mと自由地盤EL-200mで同時に観測された地震のうち、2地点のNS成分、EW成分、UD成分の最大加速度が全て1cm/s²以上を記録し、観測記録の信頼周期上限が5秒程度以上である55地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
1	2006/03/26	09:44	37.0180	136.8908	12.85	3.9	15.4	東
2	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1	北
3	2007/03/25	10:16	37.2300	136.6573	5.41	4.1	19.8	北
4	2007/03/25	11:19	37.2670	136.7007	6.84	4.2	23.0	北
5	2007/03/25	12:24	37.1995	136.7205	11.98	3.7	15.4	北
6	2007/03/25	13:02	37.2082	136.7180	12.48	3.9	16.4	北
7	2007/03/25	14:55	37.1660	136.6953	10.37	3.8	12.0	北
8	2007/03/25	15:43	37.2940	136.7718	8.90	4.5	26.2	北
9	2007/03/25	15:57	37.2288	136.7337	11.42	3.8	18.7	北
10	2007/03/25	16:53	37.2203	136.6657	7.72	3.7	18.5	北
11	2007/03/25	18:11	37.3043	136.8395	13.45	5.3	28.8	北
12	2007/03/26	02:14	37.1578	136.6695	11.96	4.2	11.9	北
13	2007/03/26	02:25	37.1838	136.5938	6.95	3.7	18.1	北
14	2007/03/26	07:16	37.1668	136.4893	0.00	5.3	24.2	西
15	2007/03/26	13:47	37.2703	136.6570	4.30	4.4	24.1	北
16	2007/03/26	14:46	37.1653	136.5518	8.62	4.8	19.4	西
17	2007/03/26	18:02	37.2762	136.7007	5.91	4.6	24.0	北
18	2007/03/27	11:33	37.2267	136.6793	7.43	3.8	18.9	北
19	2007/03/28	00:57	37.2510	136.7215	9.89	4.0	21.1	北
20	2007/03/28	08:08	37.2223	136.7088	13.29	4.9	18.0	北
21	2007/03/28	10:51	37.1757	136.6118	10.18	4.6	16.3	北
22	2007/03/28	13:05	37.2820	136.6832	6.79	4.7	24.9	北
23	2007/03/28	21:16	37.1903	136.5823	6.10	3.8	19.3	北
24	2007/03/31	08:09	37.2347	136.7598	13.47	4.4	19.5	北
25	2007/04/02	08:01	37.2073	136.6468	6.99	4.1	17.7	北
26	2007/04/11	22:11	37.0742	136.4268	8.20	4.3	26.7	西
27	2007/04/26	11:30	37.2342	136.7443	10.90	3.9	19.3	北
28	2007/05/02	20:44	37.3307	136.7628	6.59	4.7	30.1	北
29	2007/06/08	03:17	37.2245	136.6762	7.75	3.4	18.7	北
30	2007/06/11	03:45	37.2442	136.6547	7.29	5.0	21.3	北
31	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6	21.0	南
32	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8	東
33	2007/09/20	20:05	37.1485	136.4970	8.94	3.9	22.6	西
34	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8	28.9	北
35	2008/04/29	06:58	37.2325	136.7308	10.91	3.8	19.1	北
36	2008/05/02	05:46	37.2347	136.6207	3.78	4.0	21.5	北
37	2008/07/15	14:41	37.1470	136.5913	10.35	3.9	15.4	西
38	2008/07/27	10:53	37.0998	136.8142	2.08	3.2	8.9	東
39	2009/05/23	05:15	37.1438	136.5355	10.91	3.9	19.3	西
40	2013/04/04	01:58	36.7340	136.7850	12.93	4.2	36.6	南
41	2014/09/27	00:35	37.2377	136.6780	8.30	4.1	20.1	北
42	2015/02/01	00:42	37.2618	137.1442	14.84	4.4	43.3	東
43	2015/04/21	05:15	36.9450	136.7195	7.58	3.1	12.9	南
44	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8	北
45	2020/04/06	05:00	37.2677	136.8118	12.05	4.0	24.2	北
46	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9	東
47	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1	北
48	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5	東
49	2023/01/06	13:44	37.5065	137.2743	13.42	4.5	69.3	北
50	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8	北

No.	震源情報						震央距離 (km)	震央の方位
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		
51	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7	北
52	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6	北
53	2023/05/09	05:14	37.5208	137.3103	14.52	4.7	72.7	東
54	2023/05/09	05:16	37.5262	137.3173	13.86	4.4	73.6	東
55	2023/05/10	07:14	37.6010	137.2857	12.34	4.9	77.8	北

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net観測値データ」に基づく

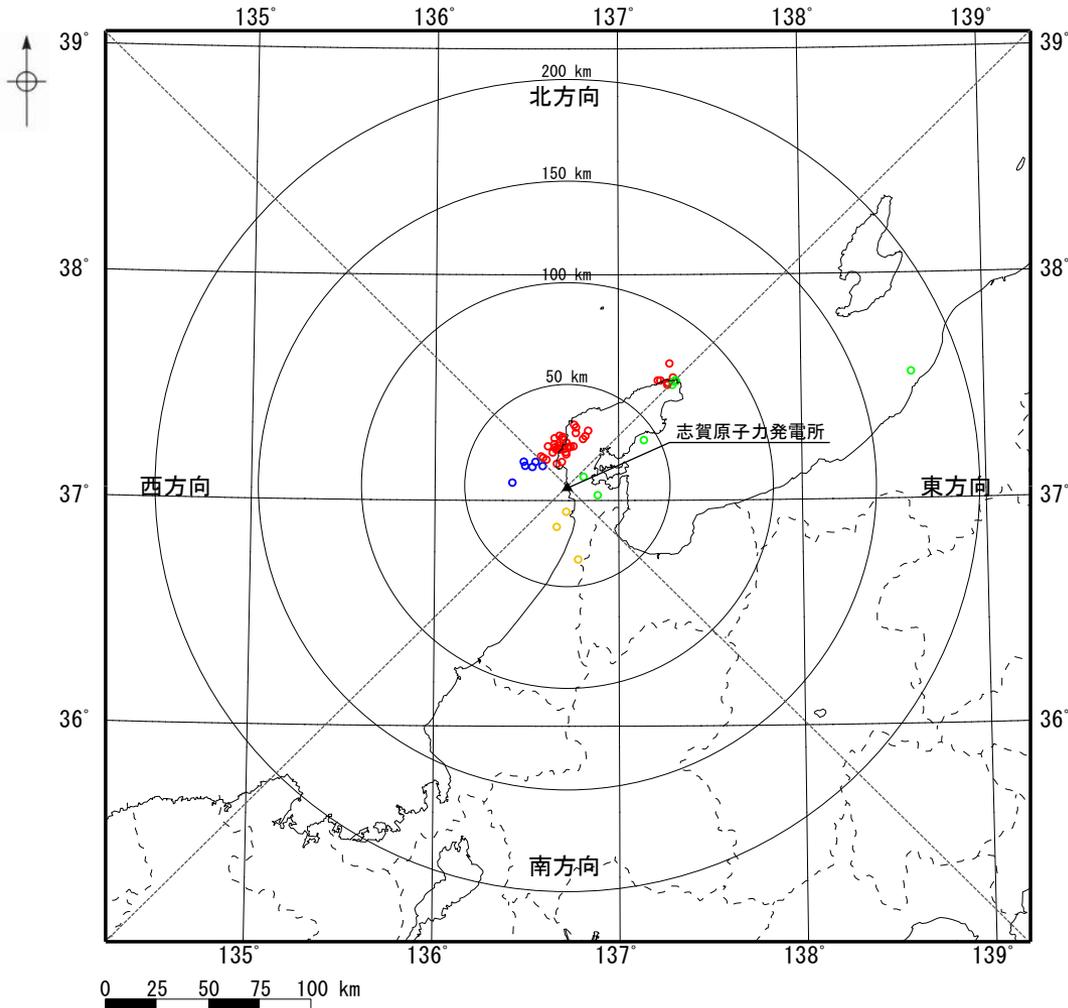
到来方向	地震数
東方向	8個
西方向	6個
南方向	3個
北方向	38個
全方向	55個

※ 震央の方位は志賀原子力発電所から震央位置を望む方位を示す。

※ 検討に用いた各地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルはデータ集P.266～321。

(2) 検討の対象とした地震 - 震央分布図 -

○ 検討の対象とした地震の震央分布図を下図に示す。

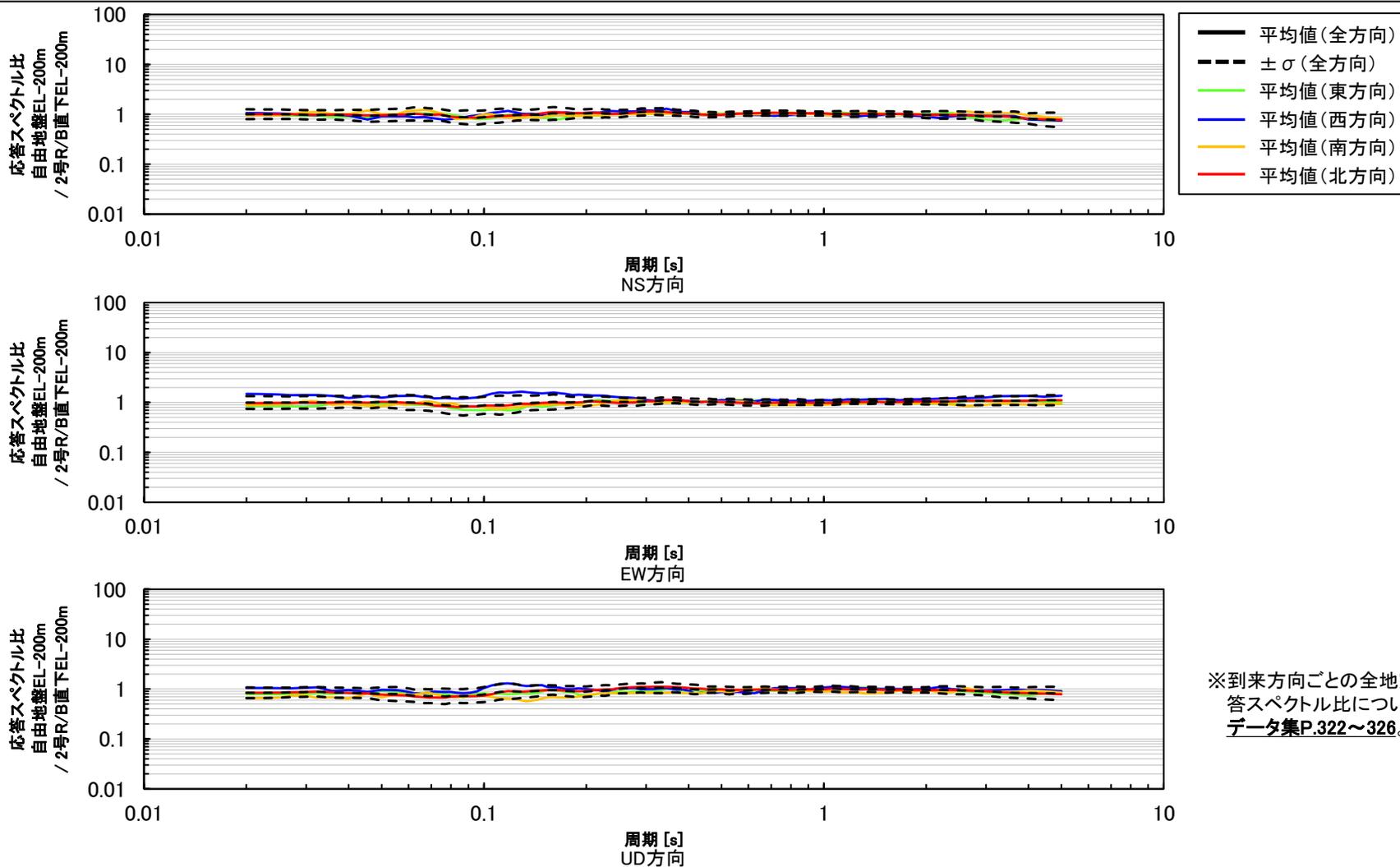


到来方向	地震数
東方向	8個
西方向	6個
南方向	3個
北方向	38個
全方向	55個

検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果

○ 2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比を地震波の到来方向ごとに比較した結果、応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度である。



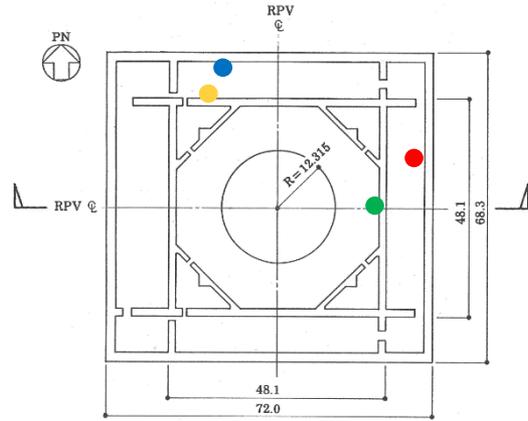
※到来方向ごとの全地震の応答スペクトル比については、データ集P.322～326。

応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋直下EL-200m)の地震波の到来方向ごとの比較

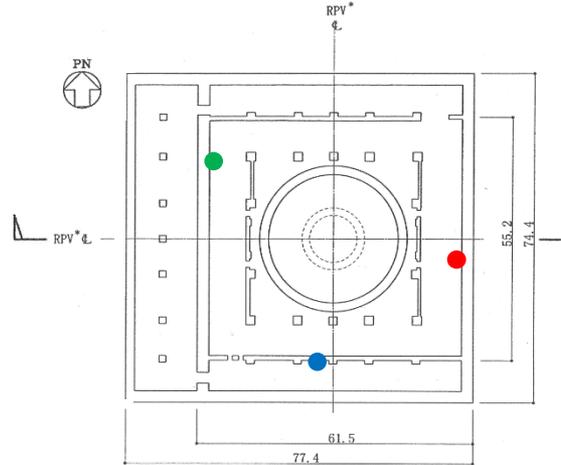
➤ 2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、2号原子炉建屋直下地震観測点周辺と自由地盤地震観測点周辺のEL-200m～地震基盤に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

(1) 検討方法

- 敷地の地震基盤以浅を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、1号原子炉建屋基礎版上及び2号原子炉建屋基礎版上での加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを比較する。
- 検討に用いる1号及び2号原子炉建屋基礎版上の地震計の設置位置を下図に示す。



1号原子炉建屋平面図(EL -1.6m)



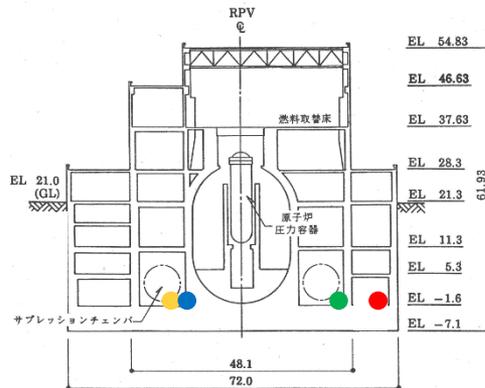
2号原子炉建屋平面図(EL 0.8m)

検討に用いた地震計

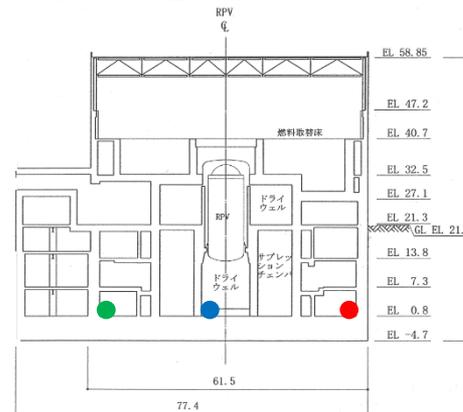
- NS方向
- EW方向
- UD方向

バックアップ用地震計

- NS・EW・UD方向(3方向)



1号原子炉建屋断面図



2号原子炉建屋断面図

検討に用いる1号及び2号原子炉建屋基礎版上の地震計設置位置

※ 断面図の地震計設置位置は、平面図に示される地震計設置位置を当該断面に投影して示す。

※ 2007年3月25日能登半島地震本震 (M6.9) については、検討に用いた地震計のうち1号原子炉建屋基礎版上の地震計の不具合により、観測記録が得られていないことから、バックアップ用地震計により得られた観測記録を用いた。

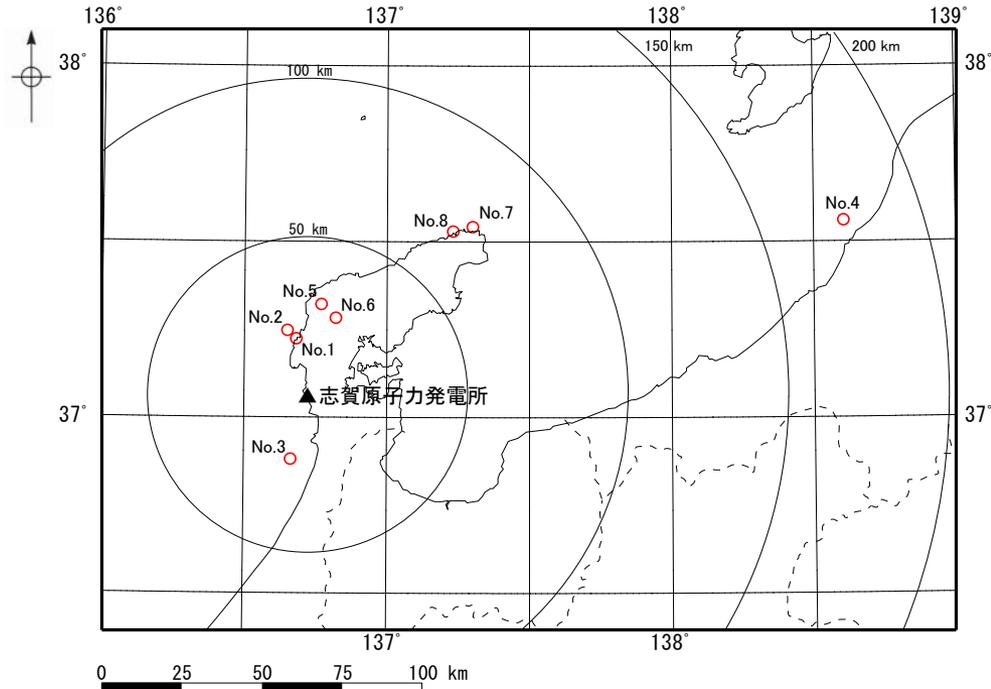
(2) 検討の対象とした地震

- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。
- 検討の対象は、2004年10月～2023年5月に1号と2号で同時に観測された地震のうち、最大加速度10cm/s²程度以上を記録し、観測記録の信頼周期上限が5秒程度以上である8地震とした。

検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)	原子炉建屋基礎版上最大加速度 (cm/s ²)					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M		1号			2号		
								NS	EW	UD	NS	EW	UD
1	2007/03/25	09:41	37.2207	136.6860	10.70	6.9	18.1	163.2	239.4	150.8	179.4	254.2	204.2
2	2007/06/11	03:45	37.2442	136.6547	7.29	5.0	21.3	34.9	30.4	18.1	36.2	33.2	17.4
3	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6	21.0	20.2	24.8	10.6	22.1	26.5	13.0
4	2007/07/16	10:13	37.5568	138.6095	16.75	6.8	175.8	5.9	5.9	2.9	6.1	7.2	3.9
5	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8	28.9	9.3	6.9	4.5	7.5	8.2	5.0
6	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8	29.2	19.6	16.4	31.7	21.5	16.9
7	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8	18.4	20.8	14.0	24.1	17.6	11.9
8	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6	10.3	12.1	7.9	11.2	12.3	9.7

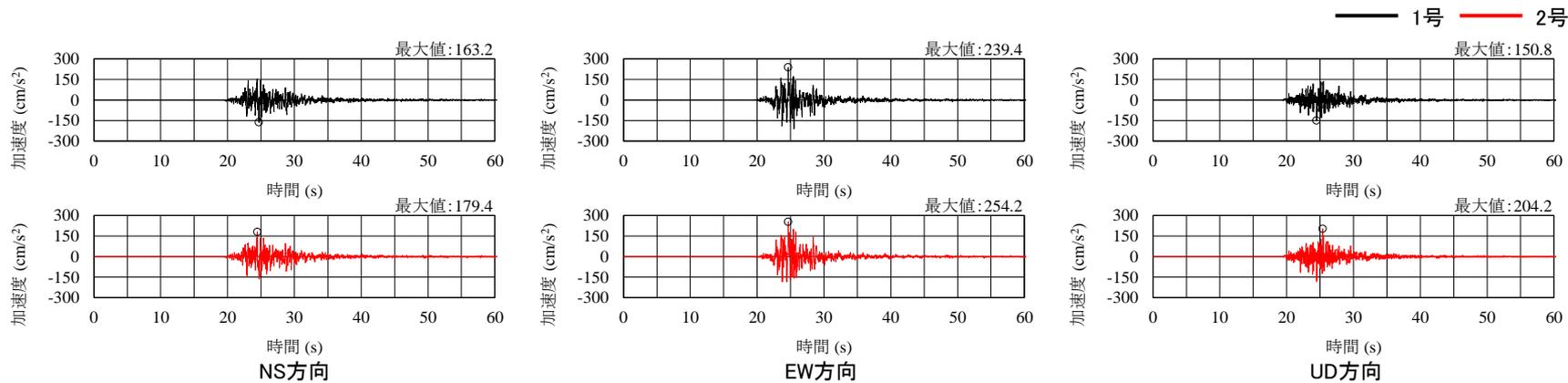
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



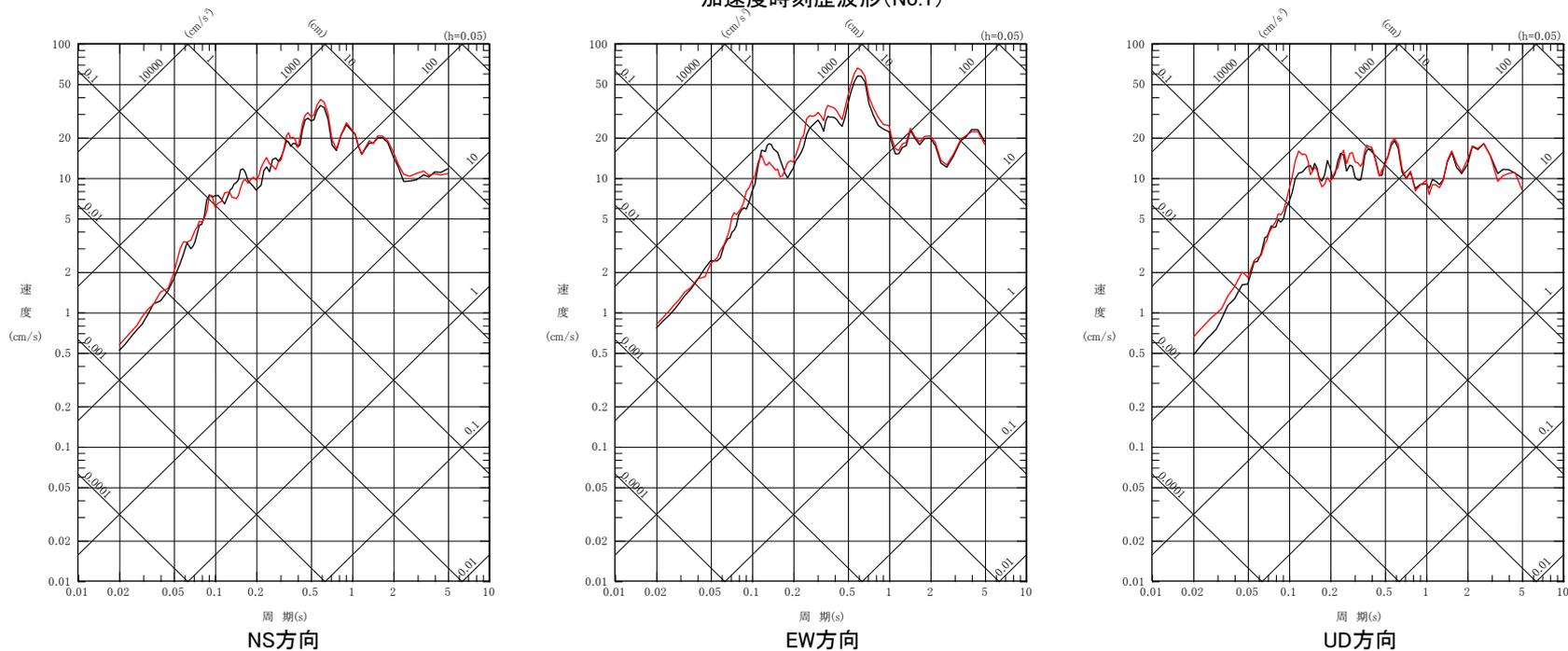
検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果(1/8)

○ No.1の地震について、1号及び2号原子炉建屋基礎版上における加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを比較した結果、1号と2号に顕著な違いはない。



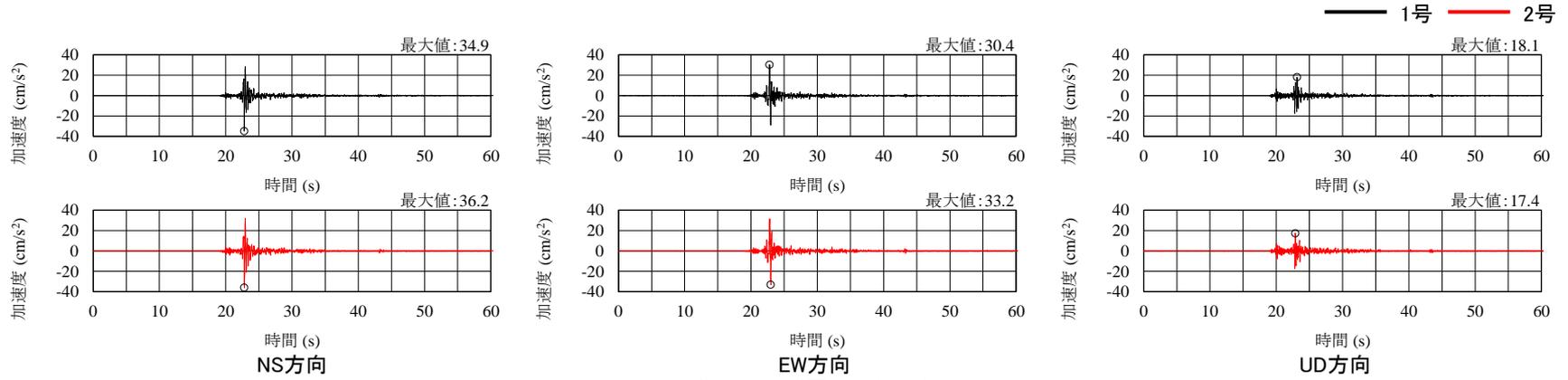
加速度時刻歴波形(No.1)



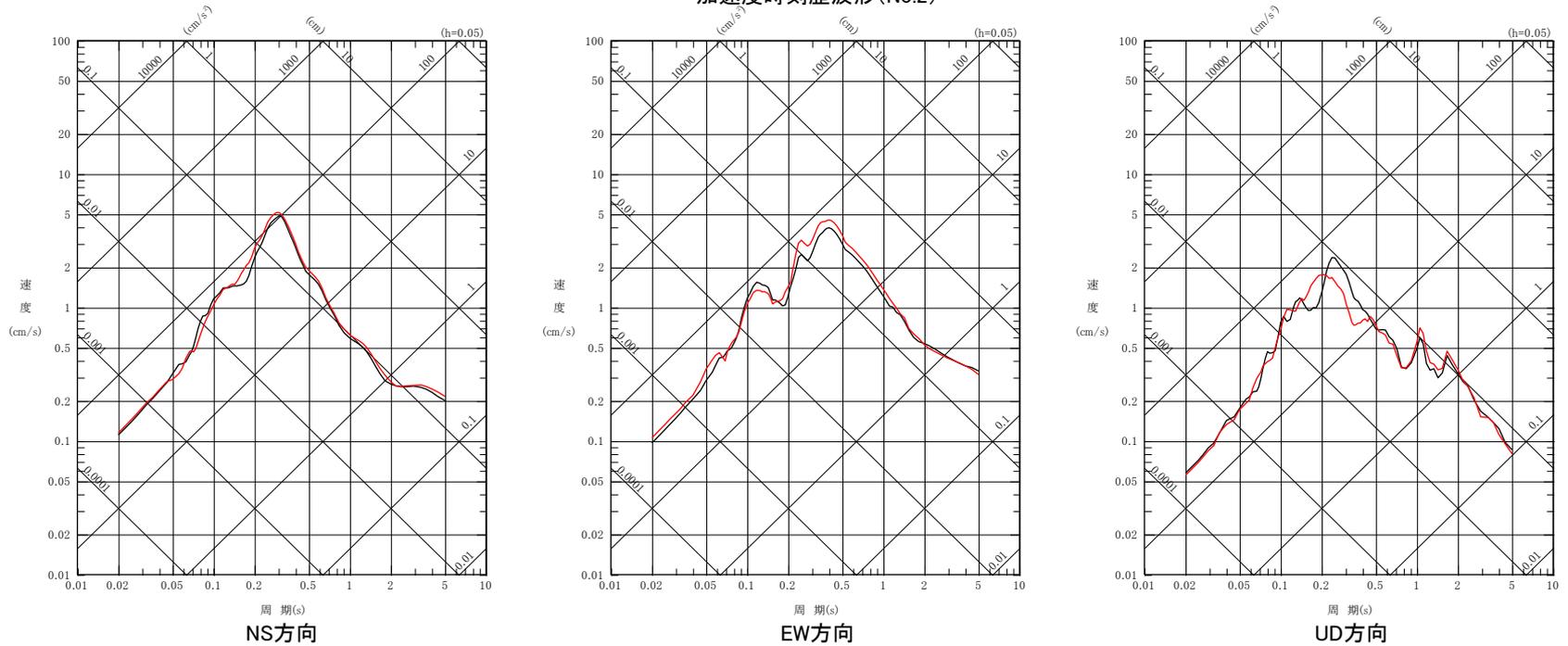
擬似速度応答スペクトル(No.1)

(3) 検討結果(2/8)

○ No.2の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。



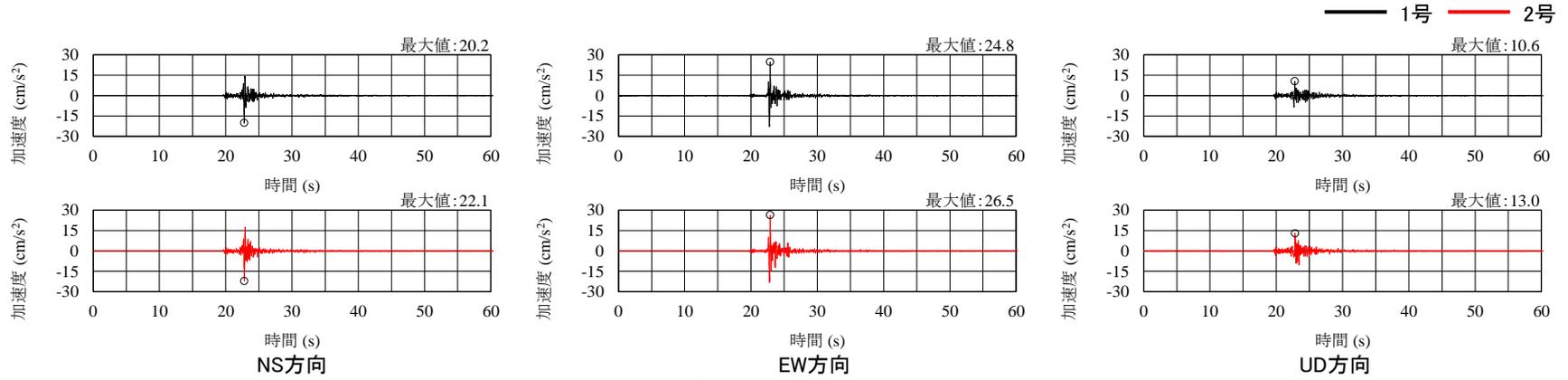
加速度時刻歴波形(No.2)



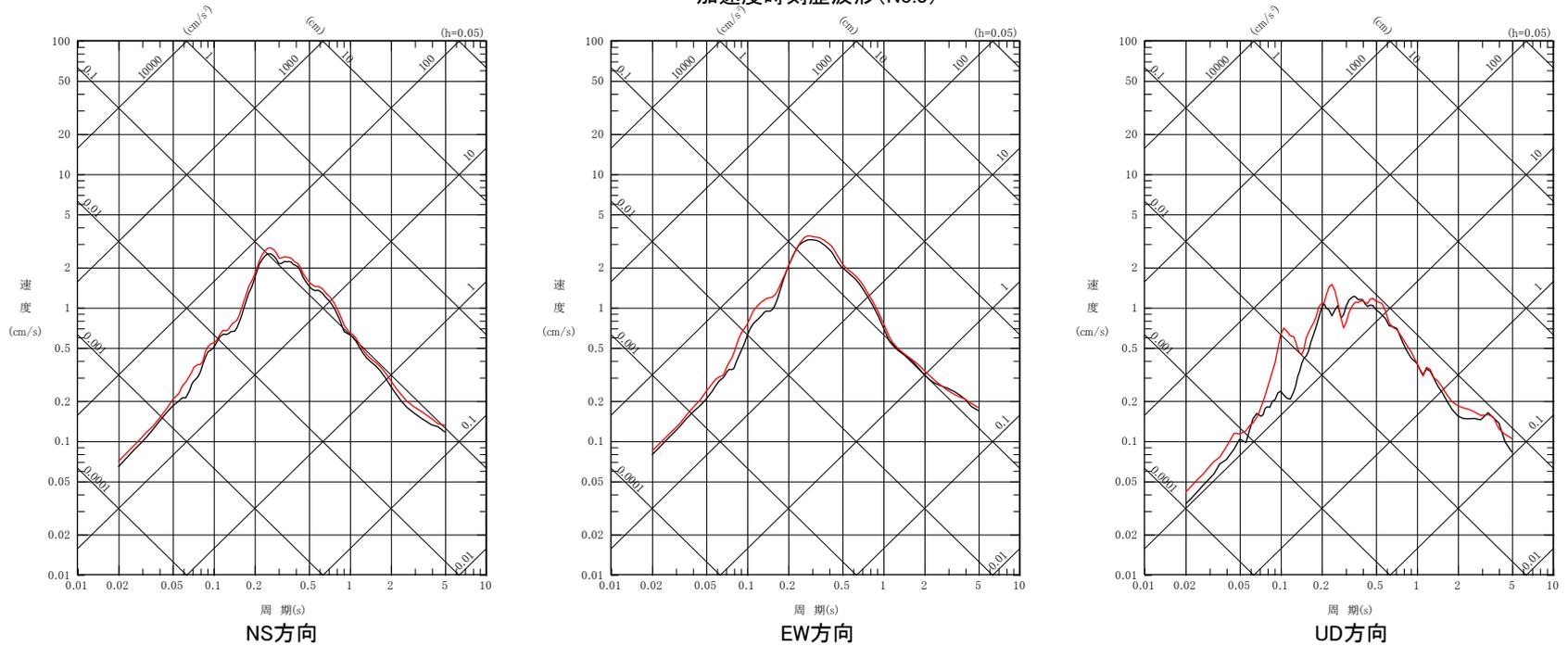
擬似速度応答スペクトル(No.2)

(3) 検討結果 (3/8)

○ No.3の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。



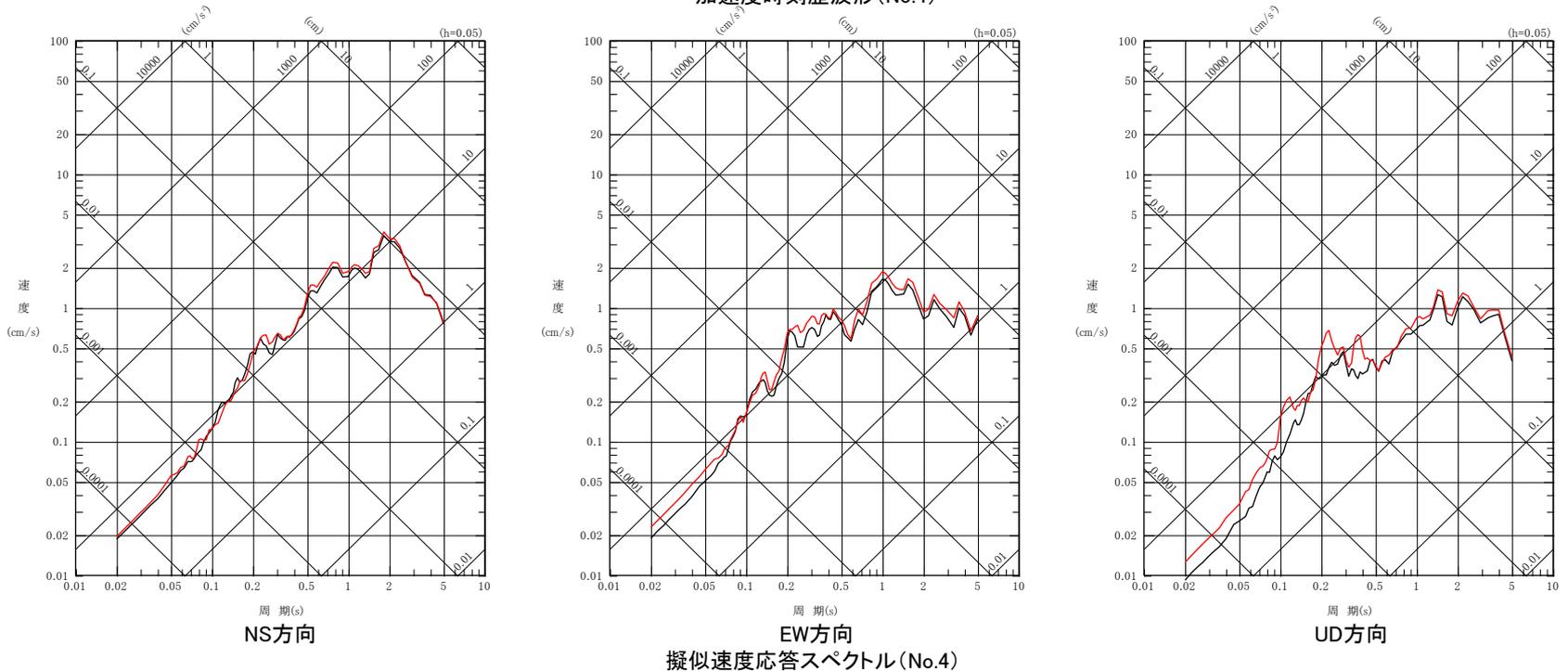
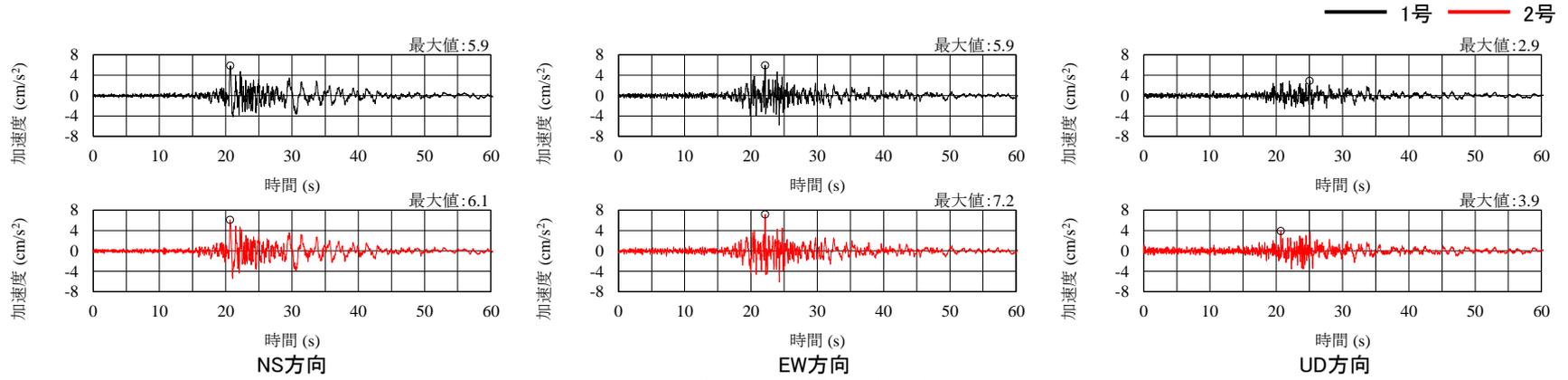
加速度時刻歴波形 (No.3)



擬似速度応答スペクトル (No.3)

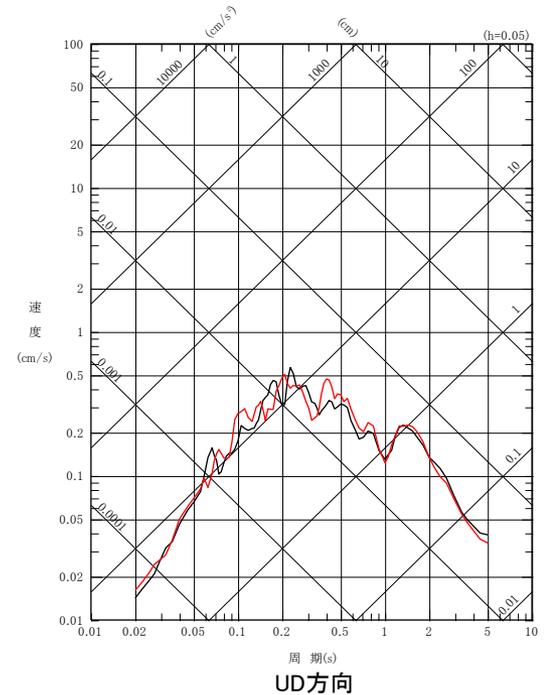
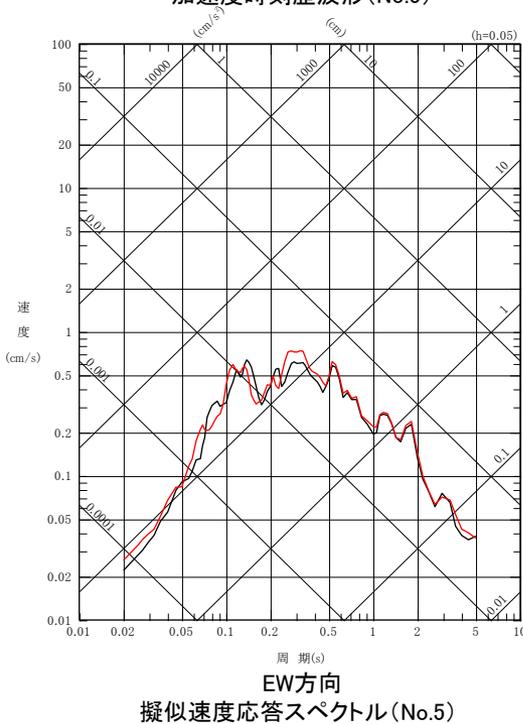
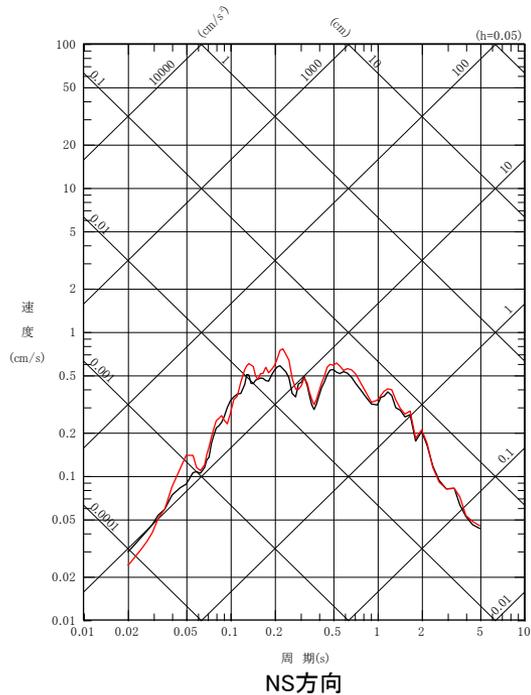
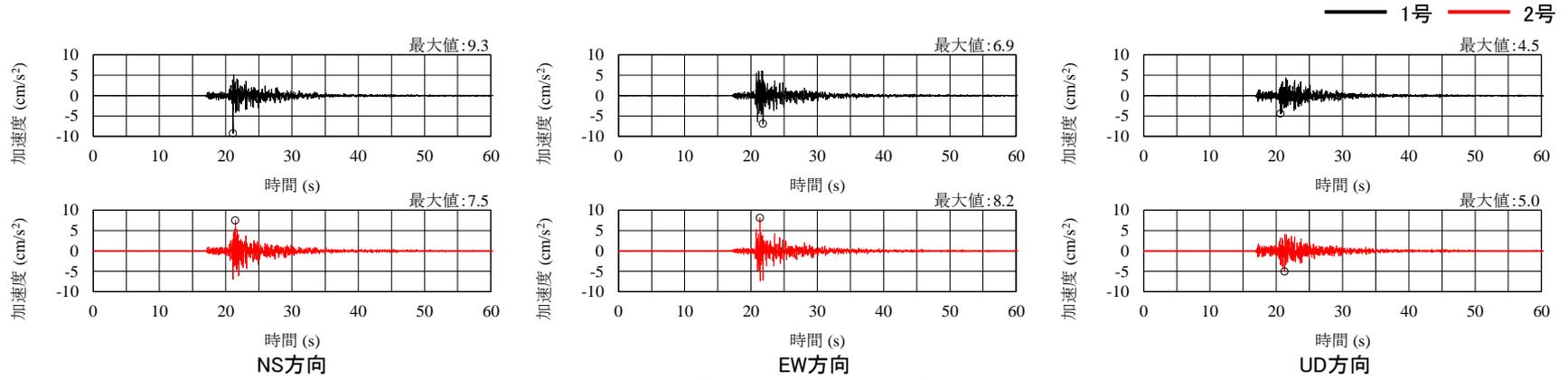
(3) 検討結果(4/8)

○ No.4の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。



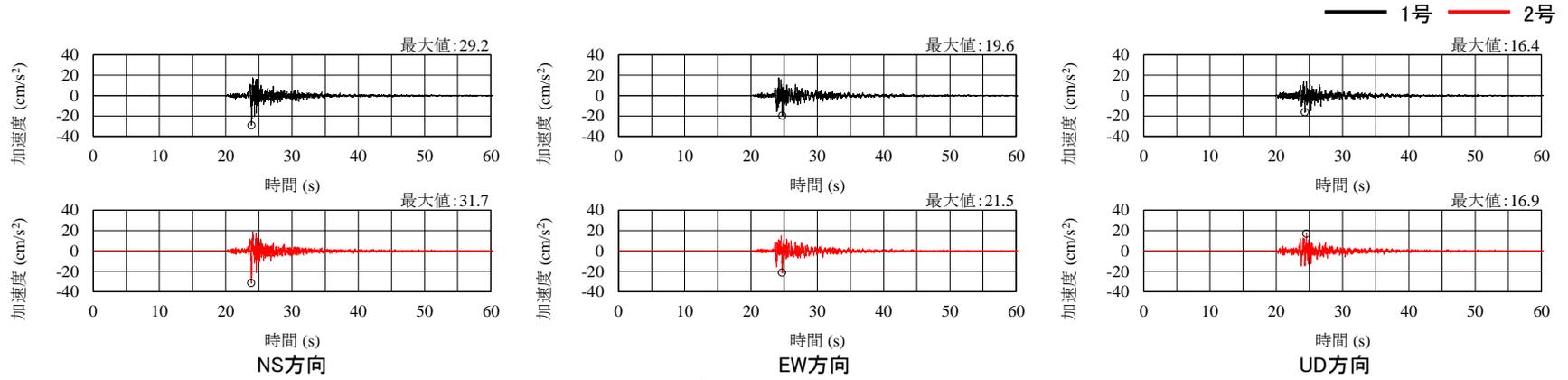
(3) 検討結果 (5/8)

○ No.5の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。

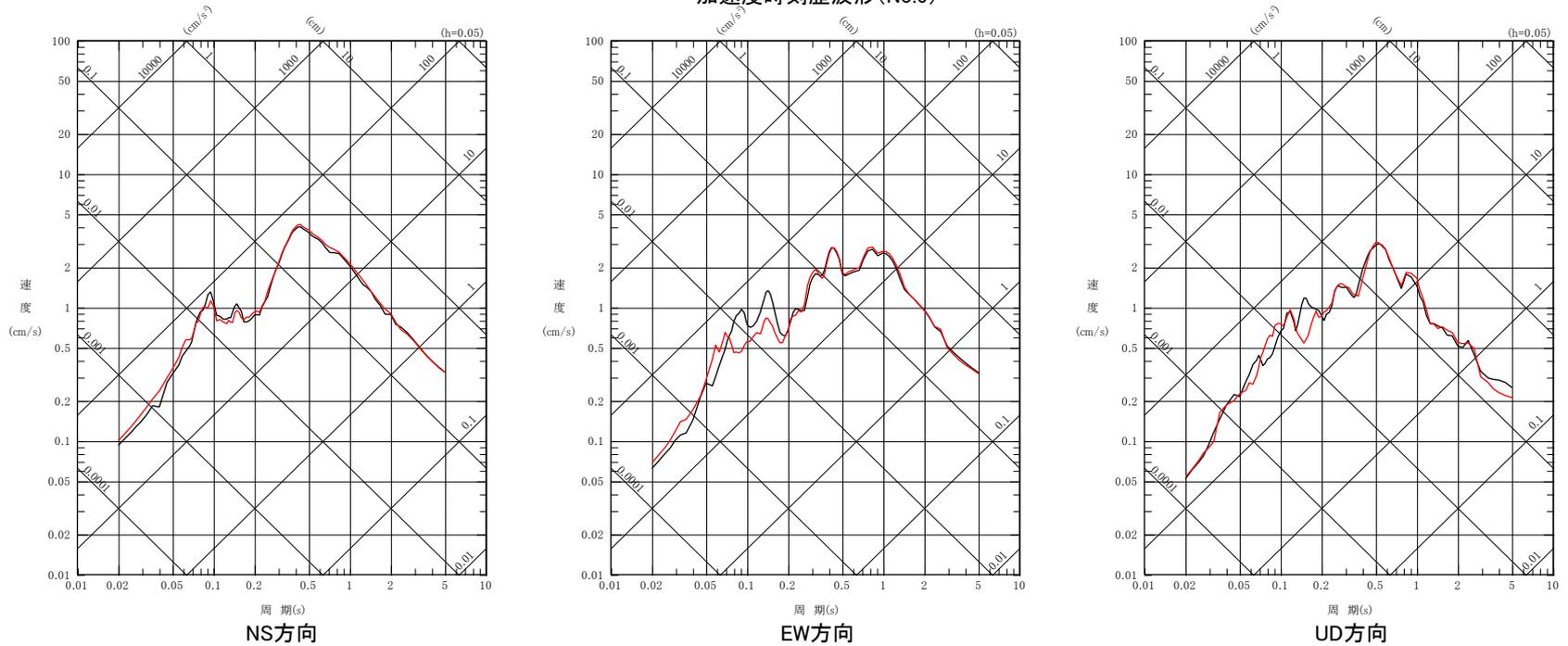


(3) 検討結果(6/8)

○ No.6の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。



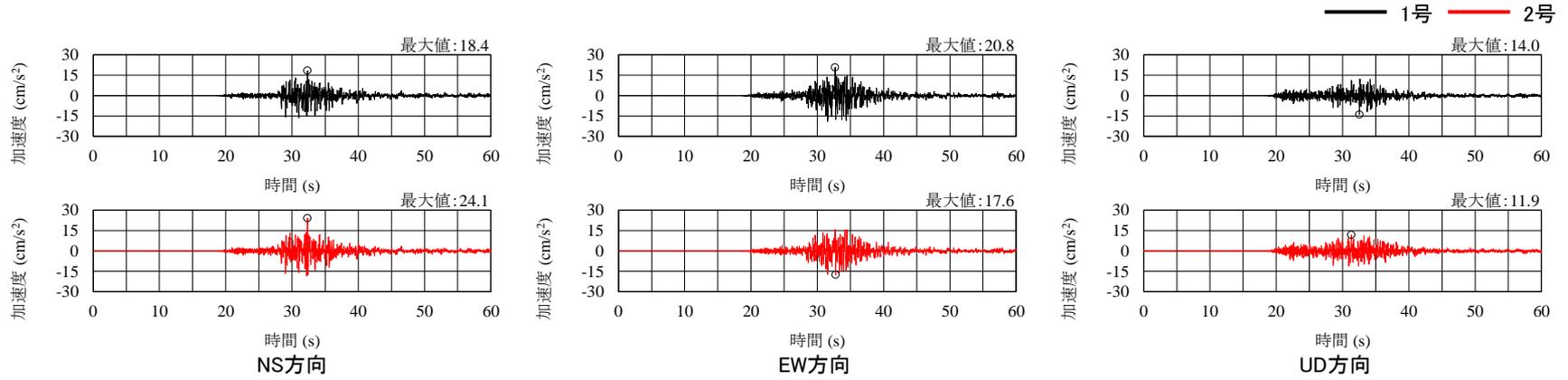
加速度時刻歴波形(No.6)



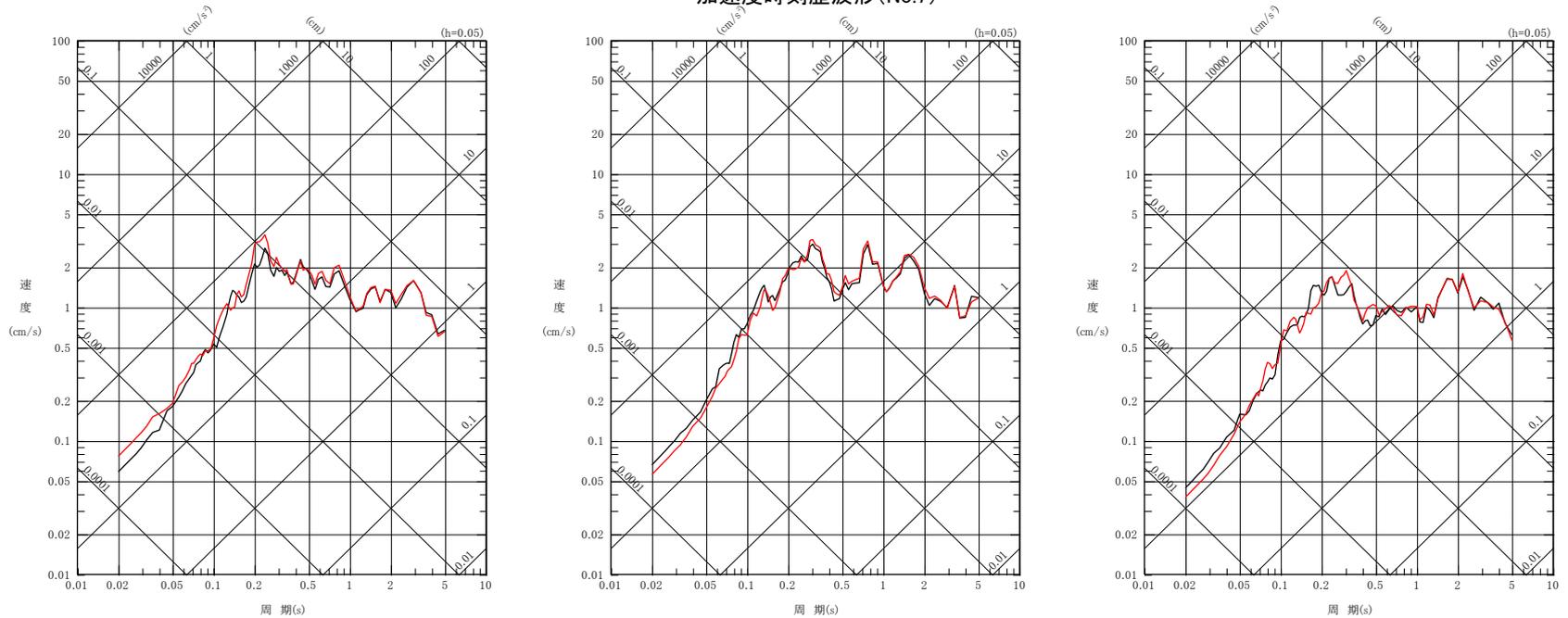
擬似速度応答スペクトル(No.6)

(3) 検討結果(7/8)

○ No.7の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。



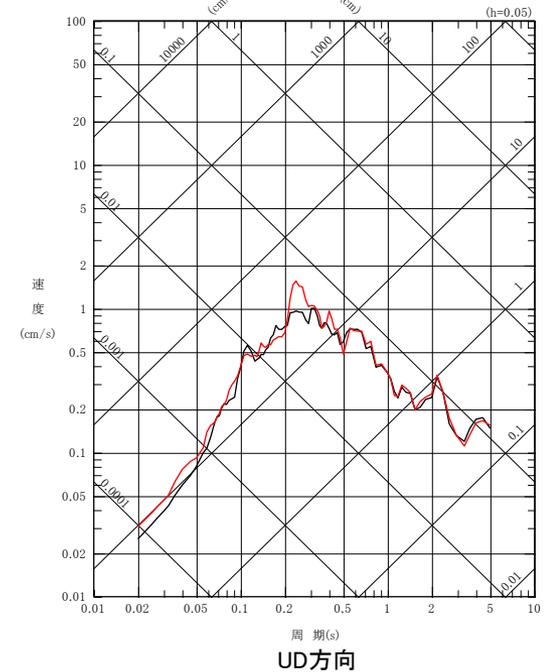
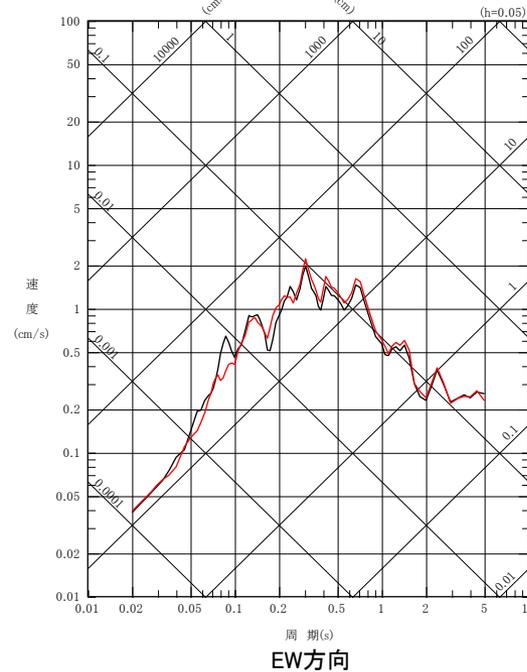
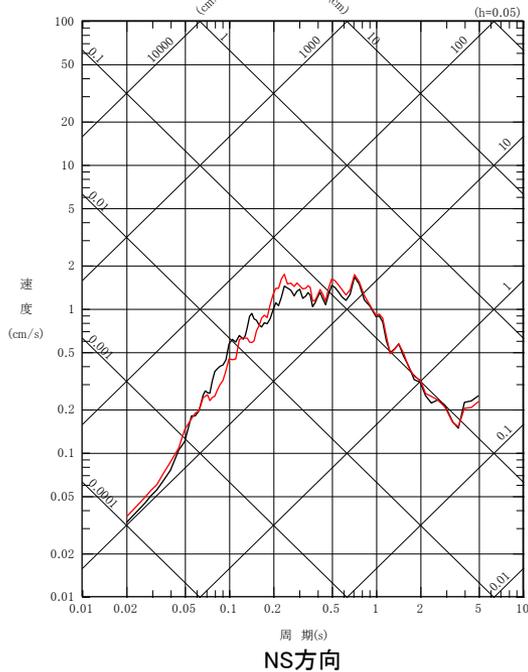
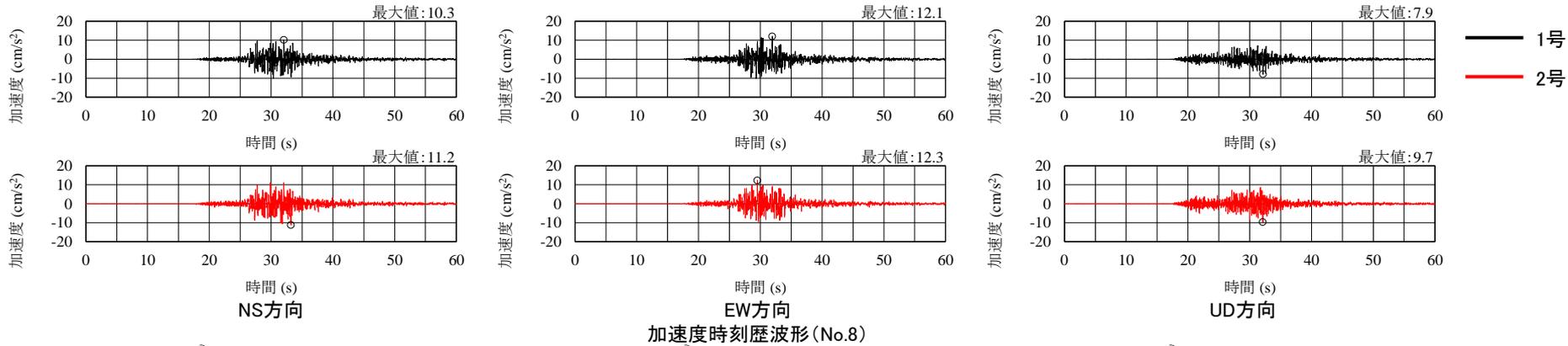
加速度時刻歴波形(No.7)



擬似速度応答スペクトル(No.7)

(3) 検討結果 (8/8)

○ No.8の地震についても、No.1の地震と同様、1号と2号に顕著な違いはない。



擬似速度応答スペクトル (No.8)

➤ No.1~8の地震について、加速度時刻歴波形及び応答スペクトルに顕著な違いはないことから、1号原子炉建屋周辺及び2号原子炉建屋周辺の地震基盤以浅に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

まとめ

- 敷地の鉛直アレー地震観測記録により敷地地盤の増幅特性を把握する(1.3.1項)とともに、地震基盤以浅の地下構造の成層性及び均質性を評価するため、敷地内の複数地点で得られた地震観測記録を比較、検討した(1.3.2項～1.3.5項)。検討結果を下記に示す。

1.3.1 鉛直アレー地震観測記録(深度別)を用いた検討

- 敷地の増幅特性(地震基盤～解放基盤表面)を把握するため、自由地盤地震観測点における深度別(EL+19.5m, EL-10m, EL-100m, EL-200m, EL-1,298m)の応答スペクトルより増幅傾向を確認した。
- いずれの地震についても、増幅傾向がみられる周期帯に顕著な違いはないことから、これらの増幅は敷地地盤固有の振動特性によるものと考えられる。

1.3.2 鉛直アレー地震観測記録(到来方向別)を用いた検討

- 敷地のEL-200m～解放基盤表面を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、自由地盤地震観測点における応答スペクトル比(EL-10m/EL-200m)を地震波の到来方向ごとに比較した。
- 自由地盤EL-200mに対する自由地盤EL-10mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはないことから、自由地盤地震観測点周辺のEL-10m～EL-200mに、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

1.3.3 水平アレー地震観測記録(地表)(到来方向別)を用いた検討

- 敷地の地震基盤以浅を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、水平アレー地震観測点(地表)間の応答スペクトル比を地震波の到来方向ごとに比較した。
- 観測点4に対する観測点1～3の応答スペクトル比の周期0.5秒以上において地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、観測点1～4周辺の地震基盤以浅(表層地盤を除く)に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

1.3.4 水平アレー地震観測記録(地中)(到来方向別)を用いた検討

- 敷地の地震基盤～EL-200mを対象に特異な速度構造の有無を確認するため、EL-200mの地震観測点間の応答スペクトル比(自由地盤EL-200m/2号原子炉建屋直下EL-200m)を地震波の到来方向ごとに比較した。
- 2号原子炉建屋直下EL-200mに対する自由地盤EL-200mの応答スペクトル比に地震波の到来方向による顕著な違いはなく、概ね1程度であることから、2号原子炉建屋直下地震観測点周辺と自由地盤地震観測点周辺のEL-200m～地震基盤に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

1.3.5 原子炉建屋基礎版上の地震観測記録を用いた検討

- 敷地の地震基盤以浅を対象に特異な速度構造の有無を確認するため、1号原子炉建屋基礎版上及び2号原子炉建屋基礎版上での加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを比較した。
- 加速度時刻歴波形及び応答スペクトルに顕著な違いはないことから、1号原子炉建屋周辺及び2号原子炉建屋周辺の地震基盤以浅に、地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられる。

- 観測記録による地下構造の検討の結果、敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられることから、地震基盤以浅の地下構造は成層かつ均質と評価できることを確認した。

まとめ

- 「**①解放基盤表面の位置**」, 「**②敷地及び敷地周辺における地層の傾斜, 断層及び褶曲構造等の地質構造**」, 「**③地震基盤の位置及び形状**」, 「**④岩相・岩質の不均一性**」及び「**⑤地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性**」を把握するため, 敷地及び敷地周辺の調査を実施した。また, 上記**①～⑤**を把握した結果を踏まえ, 敷地及び敷地周辺の地下構造が地震波の伝播特性に与える影響を検討した。検討結果を下記に示す。

1.1 地質・地質構造の調査による地下構造の検討

- 地質・地質構造の調査による地下構造の検討の結果, 敷地周辺の地質は, 新第三紀以降の地層が基盤である花崗岩類を直接覆っており, 敷地を含む邑知潟平野北側では, 大きな褶曲構造は認められない。また, 敷地の地震基盤以浅の地質は凝灰角礫岩を狭在するものの安山岩を主体とした新第三紀の岩稲階の別所岳安山岩類が広く分布しており, 速度構造は概ね水平な層構造を呈していること, 局所的に周囲と異なる速度特性を示す第3'速度層及び第4'速度層並びに大深度ボーリング2孔間で認められた花崗岩上面の高度差が解放基盤表面の地震動へ与える影響が小さいことから, 敷地の地震基盤以浅の地下構造は成層かつ均質と評価できることを確認した。
- また, 敷地の解放基盤表面は, S波速度が1.5km/sである第3速度層において著しい風化を受けていないと判断されるEL-10mの位置に設定した。

1.2 物理探査による地下構造の検討

- 物理探査による地下構造の検討の結果, 敷地周辺の地震基盤は, 深さ1km程度であり概ね水平に分布している結果が得られていることから, 概ね水平で評価できることを確認した。また, 地震基盤より深部の地下構造については, 顕著な不整形はないものと評価できることから, 成層かつ均質と評価できることを確認した。
- また, 敷地の地震基盤は, S波速度が3km/s程度以上であるEL-1.19kmの位置に設定した。

1.3 観測記録による地下構造の検討

- 観測記録による地下構造の検討の結果, 敷地の地震基盤以浅に地震動へ影響を及ぼすような特異な速度構造はないと考えられることから, 地震基盤以浅の地下構造は成層かつ均質と評価できることを確認した。

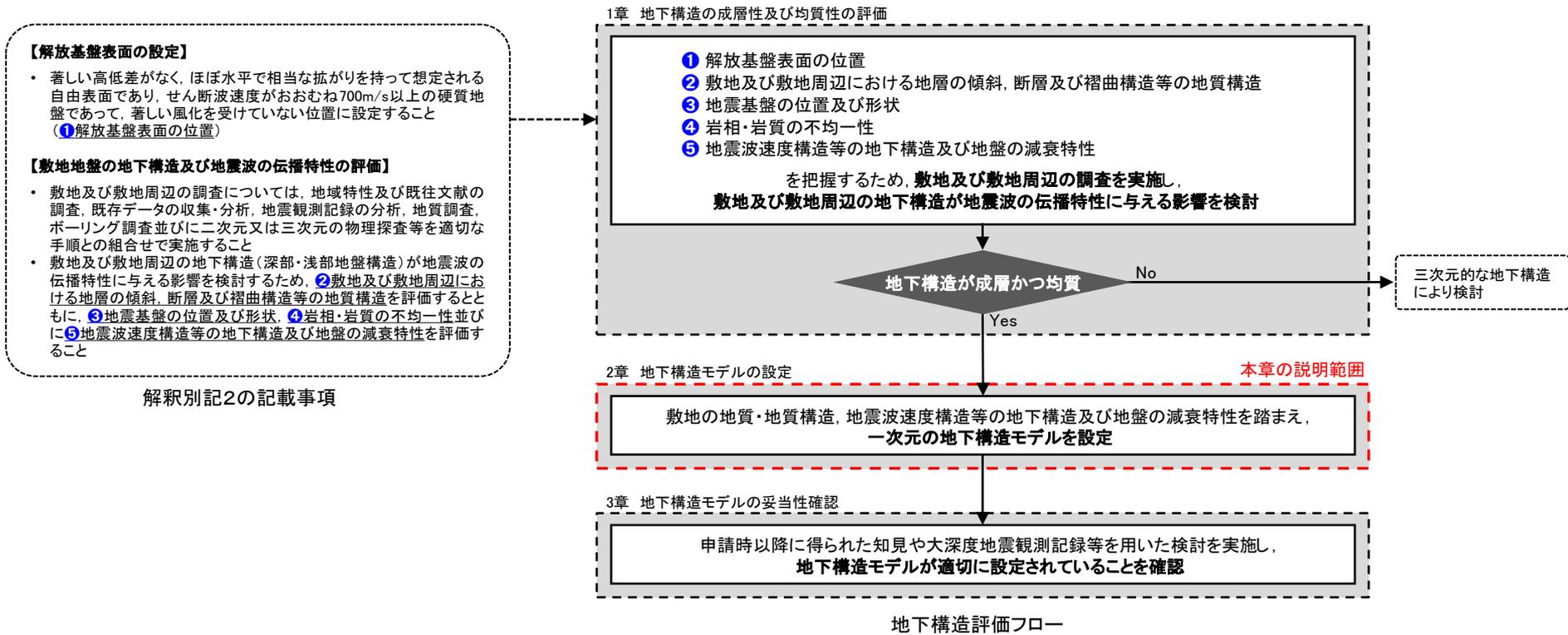
- 物理探査による地下構造の検討の結果, 敷地周辺の地震基盤は, 深さ1km程度であり概ね水平に分布している結果が得られていることから, 概ね水平で評価できることを確認した。また, 地震基盤より深部の地下構造については, 顕著な不整形はないものと評価できることから, 成層かつ均質と評価できることを確認した。
- また, 敷地の地震基盤は, S波速度が3km/s程度以上であるEL-1.19kmの位置に設定した。

2. 地下構造モデルの設定

2. 地下構造モデルの設定

(1) 地下構造モデルの設定方法

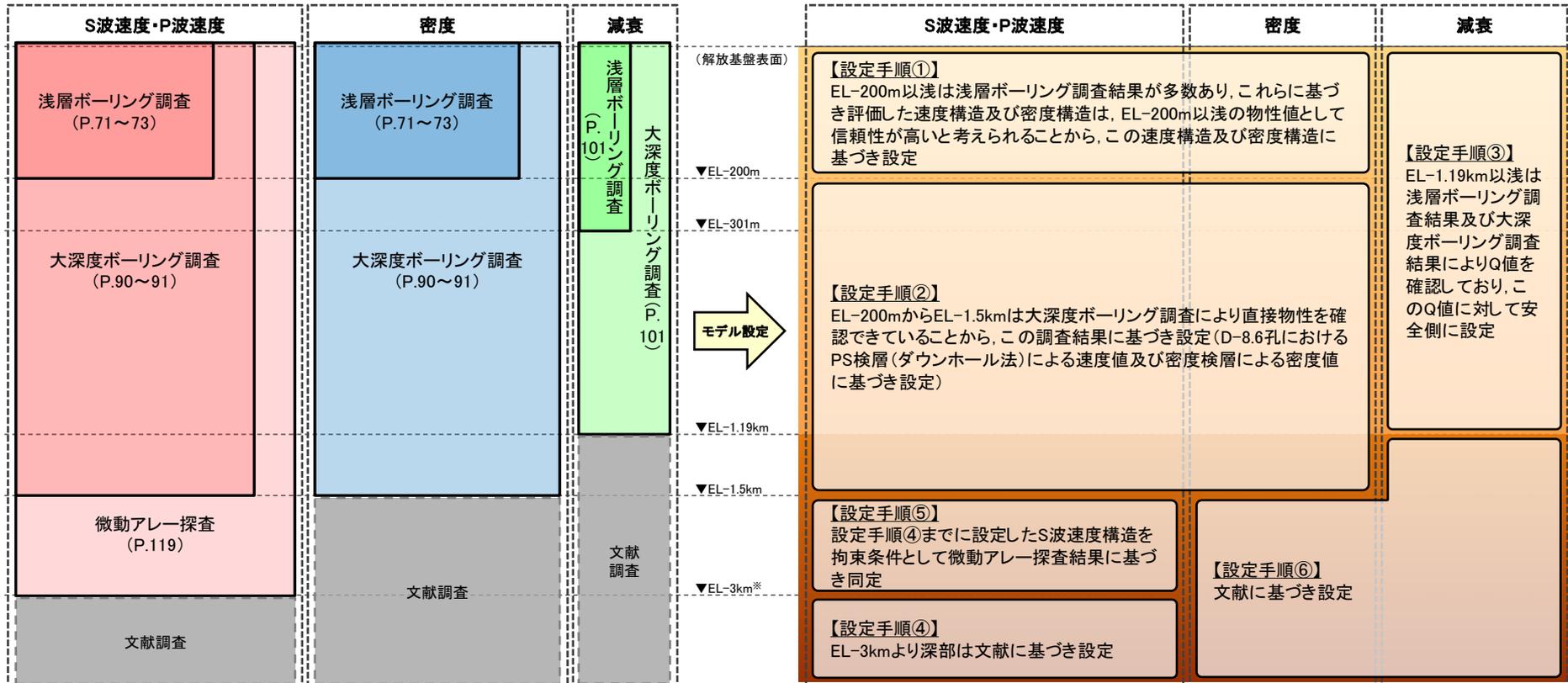
- 1章の地下構造の成層性及び均質性の評価により、敷地の地下構造は成層かつ均質と評価した。
- 2章では、下図の地下構造評価フローに基づき、「敷地近傍地下構造調査(精査)」及び「広域地下構造調査(概査)」により把握した敷地の地質・地質構造、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を踏まえ、一次元の地下構造モデルを設定する。
- 地下構造モデルの設定に用いた敷地における調査の種別及び範囲、並びに地下構造モデルの設定手順を次頁に示す。



2. 地下構造モデルの設定

(2) 敷地における調査の種別及び範囲、並びに地下構造モデルの設定手順

- 敷地の地下構造は成層かつ均質と評価できることから、鉛直アレー地震観測を実施している自由地盤位置 (P.140) に示す自由地盤地震観測点) において一次元の地下構造モデルを設定する。
- 一次元の地下構造モデルは、左下図に示す敷地における地盤調査 (浅層ボーリング調査, 大深度ボーリング調査及び微動アレー探査) の結果に基づき設定する。また、これら地盤調査の範囲より深部については文献に基づき設定する。
- 敷地における調査結果を踏まえた地下構造モデルの設定手順を右下図に示す。



敷地における調査の種別及び範囲 (深度方向)

地下構造モデルの設定手順

※ 微動アレー探査のアレー半径 (1km) を踏まえて設定。

2. 地下構造モデルの設定

(3) 設定手順① EL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度 (3/3)

- 前頁に示す速度構造及び密度構造断面における自由地盤位置の速度構造及び密度構造を左上表に示す。
- 左上表の層区分の標高は、自由地盤位置の鉛直アレー地震計の設置に際して別途実施したボーリング調査による層区分(左下表)を踏まえて設定した。また、左上表の速度及び密度は、前頁に示す速度構造及び密度構造断面における自由地盤位置の速度及び密度を示す。
- なお、原子炉設置位置付近の速度構造等の調査結果(P.71~73, P.90)において、EL-200mに速度及び密度の明瞭な境界はみられないが、左上表に示す速度構造及び密度構造は、EL-200m以浅の多数の浅層ボーリング調査結果に基づくものであり、物性値として信頼性が高いと考えられることから、地下構造モデルのEL-200m以浅のS波速度, P波速度及び密度は、左上表に示す速度構造及び密度構造に基づき設定し、EL-200mに層境界を設定した。

自由地盤位置の速度構造及び密度構造

層区分	標高EL ^{※1}	V _s ^{※2} (km/s)	V _p ^{※2} (km/s)	密度 ^{※2} (t/m ³)
埋土速度層	+21m ~ +17.1m	0.25	0.79	2.20
第2速度層	+17.1m ~ -4.9m	0.60	1.37	1.97
第3速度層	-4.9m ~ -108.9m	1.50	3.19	2.37
第4速度層	-108.9m ~ -200m	1.96	3.96	2.38

※1: 自由地盤位置の鉛直アレー地震計(EL+19.5m, -10m, -100m, -200m)の設置に際して別途実施したボーリング調査による層区分(下表)を踏まえて設定した。
 ※2: 前頁に示す速度構造及び密度構造断面における自由地盤位置の速度及び密度を示す。

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V _s (km/s)	P波速度 V _p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□: 浅層ボーリング調査結果に基づき設定した範囲

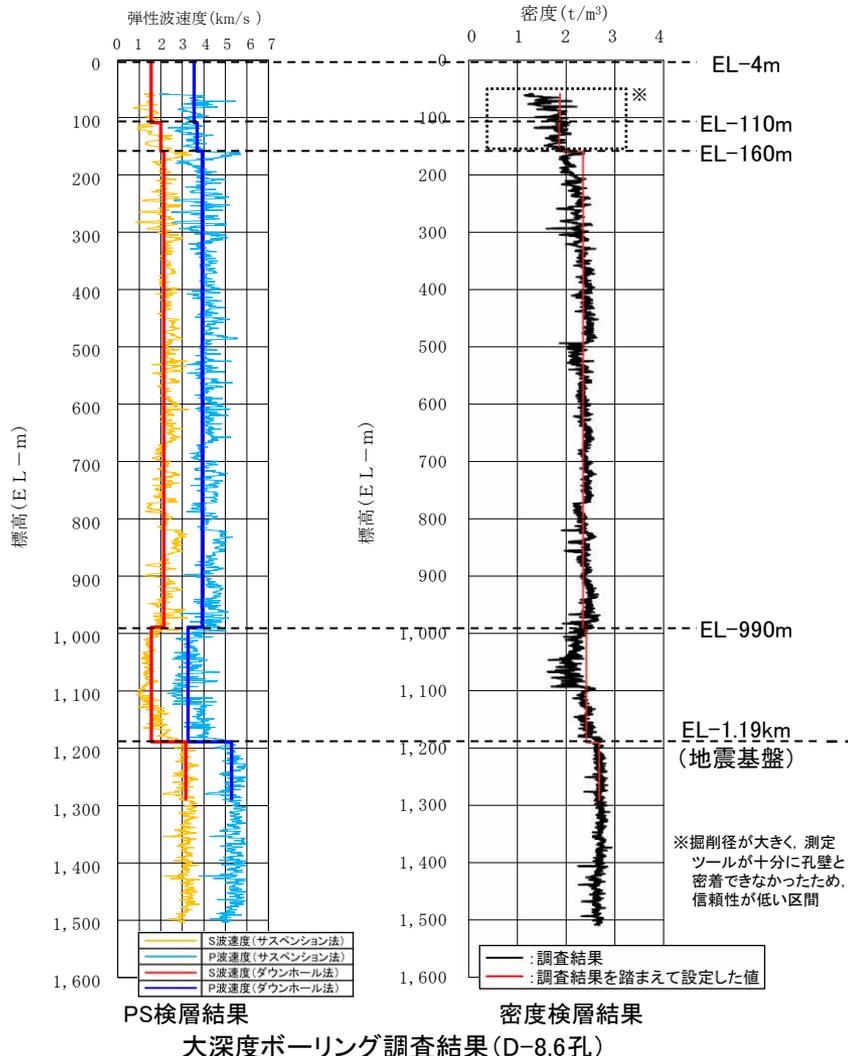
自由地盤位置の鉛直アレー地震計の設置に際して実施したボーリング調査による層区分

層区分	標高EL
埋土速度層	+21m ~ +17.1m
第2速度層	+17.1m ~ -4.9m
第3速度層	-4.9m ~ -108.9m
第4速度層	-108.9m ~ -200m

2. 地下構造モデルの設定

(4) 設定手順② EL-200mからEL-1.5kmのS波速度, P波速度及び密度

○ EL-200mからEL-1.5kmのS波速度, P波速度及び密度は, 大深度ボーリング調査により直接物性を確認できていることから, 当該深度の地下構造モデルのS波速度, P波速度及び密度はこの調査結果に基づき設定した。大深度ボーリング調査は2孔(K-13.6孔及びD-8.6孔)で実施しているが, 2孔の物性値(S波速度, P波速度及び密度)は同程度の値を示す(P.90~91)ことから, 自由地盤位置において, より深部まで物性を把握できているD-8.6孔の調査結果(PS検層(ダウンホール法)による速度値及び密度検層による密度値)に基づき設定した。なお, D-8.6孔のEL-200m以浅の速度構造は, EL-160mに層境界がみられるが, これを境界として, 速度値に顕著な違いはなく, また, 設定した地下構造モデルの速度構造とも整合的である。



大深度ボーリング調査結果 (D-8.6孔) による層区分毎の速度 (ダウンホール法) 及び密度

層区分	標高EL	Vs (km/s)	Vp (km/s)	密度 (t/m ³)
1 (第3速度層)	-4m ~ -110m	1.55	3.55	1.87*
2 (第4速度層)	-110m ~ -160m	2.00	3.69	1.85*
3	-160m ~ -990m	2.14	3.92	2.34
4	-990m ~ -1190m	1.56	3.26	2.41
5	-1190m ~ -1290m	3.16	5.29	2.67

* 掘削径が大きく, 測定ツールが十分に孔壁と密着できなかったため, 信頼性が低い区間

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km*	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

大深度ボーリング調査結果に基づき設定した範囲

* EL-1.19km~EL-1.5kmの物性値をEL-1.5km~-1.79kmの間まで適用できることについては, 設定手順⑤ (P.188~189) において確認

2. 地下構造モデルの設定

(5) 設定手順③ EL-1.19km以浅の減衰

- EL-1.19km以浅の減衰は、浅層ボーリング調査結果及び大深度ボーリング調査結果によりQ値を確認しており、当該深度の地下構造モデルのQ値は、この調査結果に対して安全側に設定した。
- 浅層ボーリング調査(R-9孔)及び大深度ボーリング調査(D-8.6孔)によるQ値測定結果(P.101)を下表に示す。
- R-9孔とD-8.6孔の層区分1及び層区分2はそれぞれ第3速度層及び第4層速度層に対応するものとし、EL-10m～EL-108.9mのQ値は層区分1のQ値測定結果を、EL-108.9m～EL-200mのQ値は層区分2のQ値測定結果を上回るように設定した。またEL-200m～EL-990mのQ値はD-8.6孔の層区分3のQ値測定結果を、EL-990m～EL-1.19kmのQ値はD-8.6孔の層区分4のQ値測定結果を上回るように設定した。

最大振幅法によるQ値測定結果

調査位置	層区分	標高EL (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値
R-9孔	1 (第3速度層)	1 ~ -97	24	10.4
	2 (第4速度層)	-97 ~ -301	25	8.9
D-8.6孔	1 (第3速度層)	-4 ~ -110	32	8.1
	2 (第4速度層)	-110 ~ -160	26	7.6
	3	-160 ~ -990	27	27.4
	4	-990 ~ -1190	22	47.0

設定した地下構造モデル

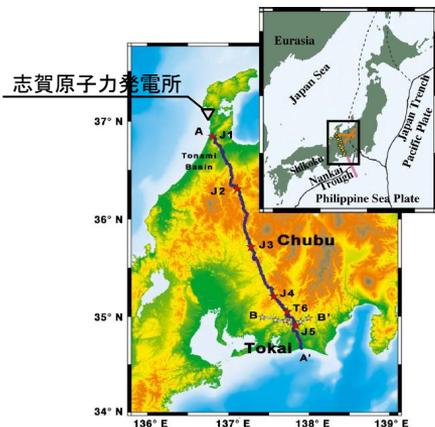
標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□: 浅層ボーリング調査結果及び大深度ボーリング調査結果に対して安全側に設定した範囲
Q値は、 $Q=1/2h$ の関係式より算出した。(調査結果を上回るQ値になるように減衰定数hを設定)

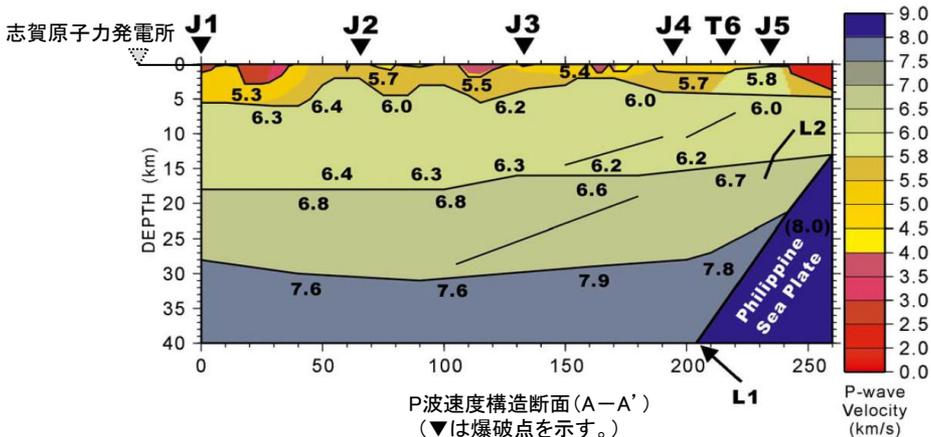
2. 地下構造モデルの設定

(6) 設定手順④ EL-3km以深のS波速度及びP波速度 (1/3)

- 地下構造モデルのEL-3kmより深部の速度構造は文献に基づき設定した。
- 敷地周辺においては, Iidaka et al.(2003)(P.115) 及びIidaka et al.(2008)(P.116)により詳細なP波速度構造が求められている。Iidaka et al.(2003)は, Iidaka et al.(2008)と比較して調査測線が長く, 深さ40kmまでの大局的なP波速度構造が求められている。一方で, Iidaka et al.(2008)は, Iidaka et al.(2003)と比較して調査測線が短いが, 敷地の近くにおいては深さ5km程度以浅についてより詳細なP波速度構造が求められている。
- このことを踏まえ, 深さ5km程度以深についてはIidaka et al.(2003), 深さ5km程度以浅についてはIidaka et al.(2008)に基づき設定した。



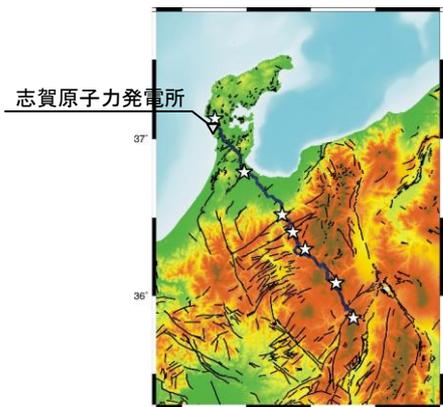
調査測線図(A-A')
(★は爆破点を示す。)



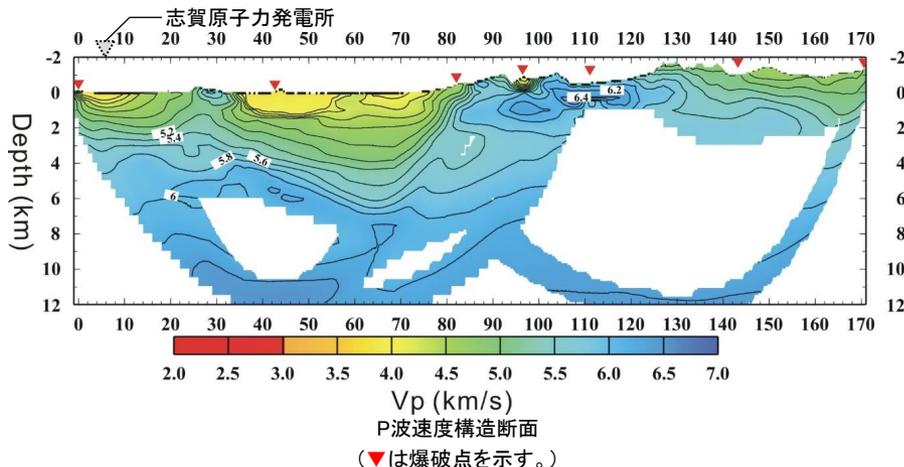
P波速度構造断面(A-A')
(▼は爆破点を示す。)

Iidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆



調査測線図
(☆は爆破点を示す。)



Vp (km/s)
P波速度構造断面
(▼は爆破点を示す。)

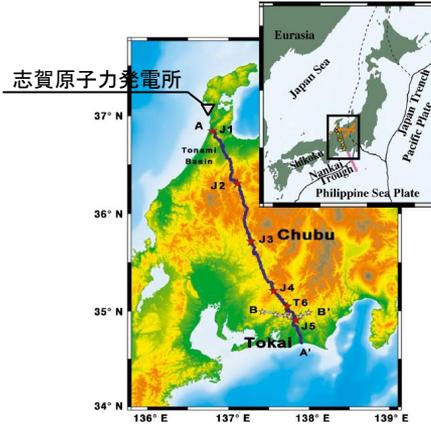
Iidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2008)に一部加筆

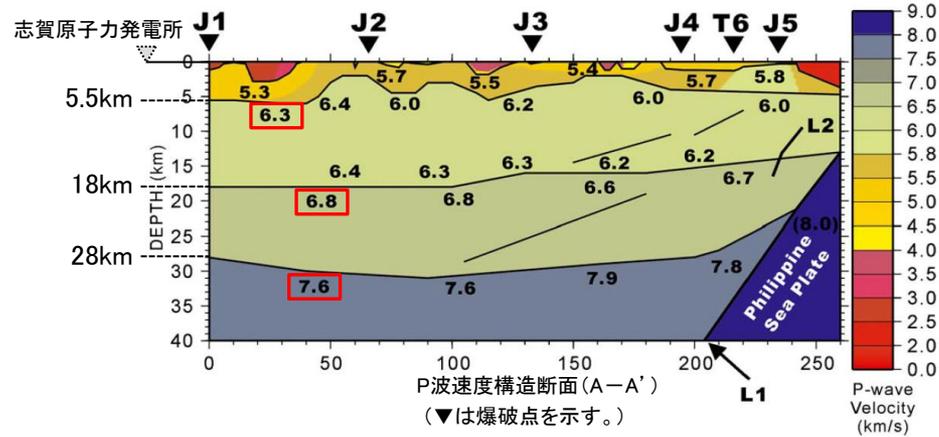
2. 地下構造モデルの設定

(6) 設定手順④ EL-3km以深のS波速度及びP波速度 (2/3)

- Iidaka et al.(2003)による敷地周辺の深さ5km程度以深のP波速度構造に基づき、地下構造モデルのEL-5.5km以深のP波速度構造を設定した。
- また、設定したP波速度に対応するS波速度は、地殻構造の平均的な V_s-V_p 関係 ($V_s=V_p/\sqrt{3}$) に基づき設定した。



調査測線図(A-A')
(★は爆破点を示す。)



Iidaka et al.(2003)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2003)に一部加筆

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

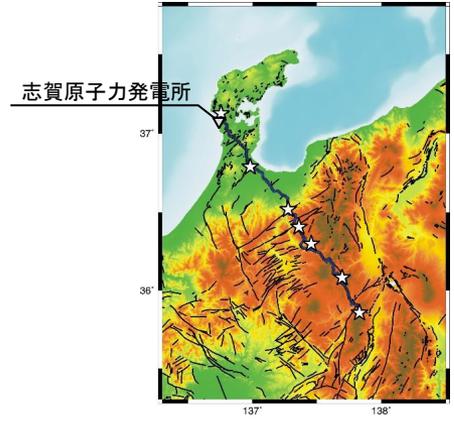
☐: Iidaka et al.(2003)に基づき設定した範囲

☐: 地殻構造の平均的な V_s-V_p 関係に基づき設定した範囲

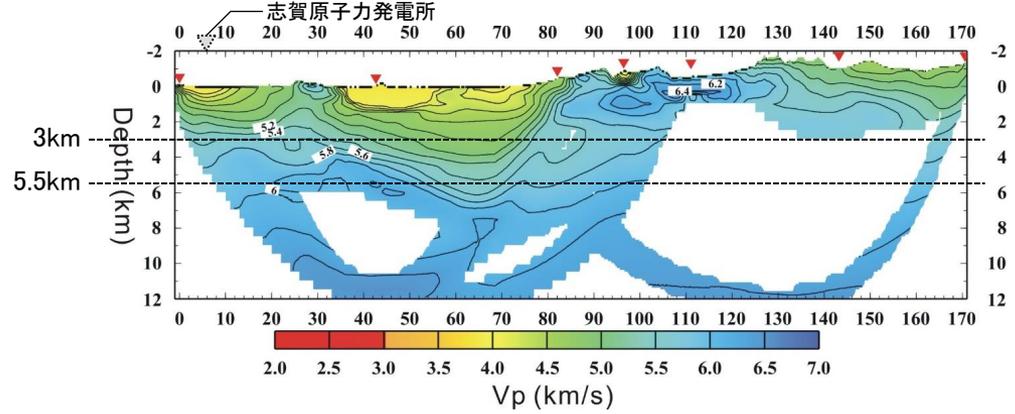
2. 地下構造モデルの設定

(6) 設定手順④ EL-3km以深のS波速度及びP波速度 (3/3)

- Iidaka et al.(2008)によるP波速度構造に基づき、地下構造モデルのEL-5.5kmからEL-3kmまでのP波速度構造を設定した。
- Iidaka et al.(2008)による敷地の近くにおけるP波速度構造を見ると、深さ5.5kmから3kmの範囲において深さ方向の速度の変化は比較的緩やかであることから、深さ5.5km~3kmをひとつの層として設定することとし、この層のP波速度は深さ3km程度におけるP波速度値(5.6km/s)とした。
- また、設定したP波速度に対応するS波速度については、設定したP波速度(5.6km/s)が大深度ボーリング調査(D-8.6孔)におけるサスペンション法のVs-Vp関係のデータ(左下図中赤丸)の範囲内であることから、敷地の特性をより反映させるため、このVs-Vp関係のデータの直線近似(左下図中青線)に基づき設定した。



調査測線図
(☆は爆破点を示す。)

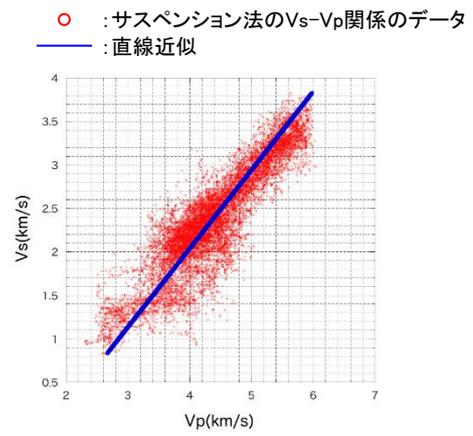


P波速度構造断面
(▼は爆破点を示す。)

Iidaka et al.(2008)による調査測線図及びP波速度構造断面

※ Iidaka et al.(2008)に一部加筆

設定した地下構造モデル



大深度ボーリング調査(D-8.6孔)におけるサスペンション法のVs-Vp関係

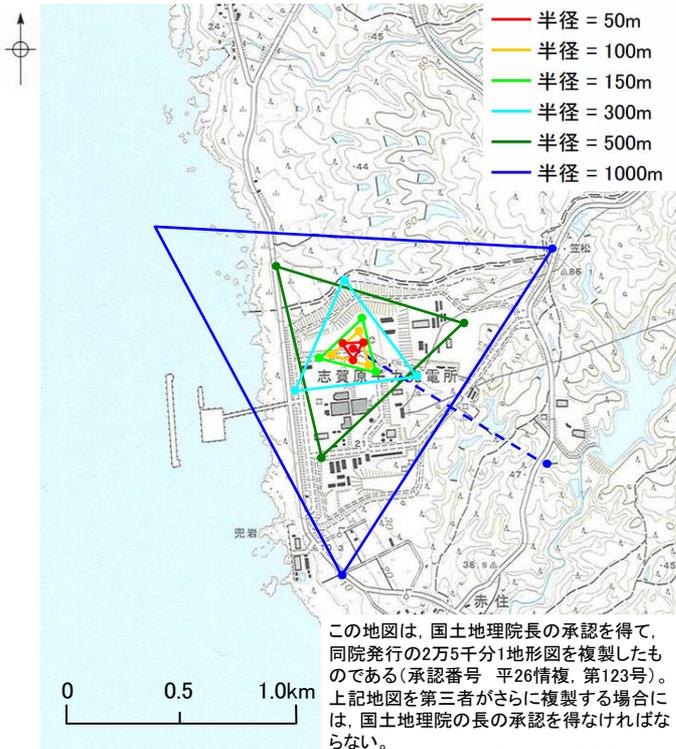
標高EL	層厚(m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-3km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-5.5km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-18km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-28km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

Red box: Iidaka et al.(2008)に基づき設定した範囲
Blue box: 大深度ボーリング調査結果によるVs-Vp関係に基づき設定した範囲

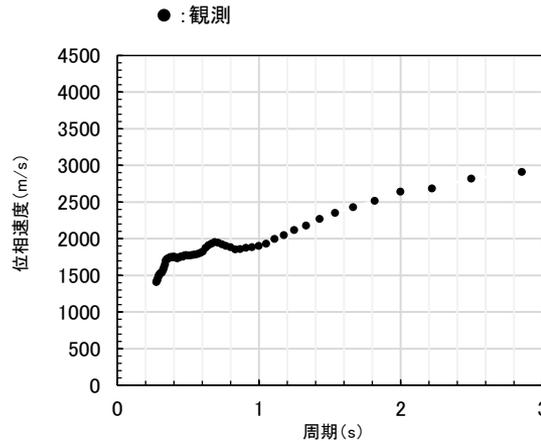
2. 地下構造モデルの設定

(7) 設定手順⑤ EL-1.19kmからEL-3kmのS波速度及びP波速度 (1/2)

- 地下構造モデルのEL-1.19kmからEL-3kmのS波速度構造は、設定手順④までに設定したS波速度構造を拘束条件として微動アレー探査結果に基づき同定した。
- S波速度構造の同定は、敷地における微動アレー探査(A地点)により得られた分散曲線に整合する理論分散曲線を与える速度構造を探索することにより行った。
- 微動アレー探査地点、探査により得られた分散曲線及び探索範囲を下記に示す。



微動アレー探査地点(A地点)



A地点の分散曲線

探索範囲

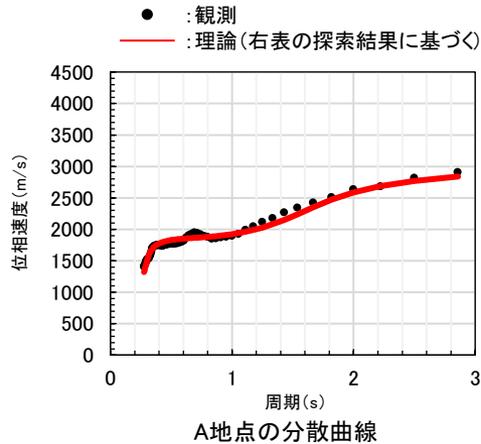
標高EL	No.	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)
-10m	1	98.9	1.50
-108.9m	2	91.1	1.96
-200m	3	790	2.14
-990m	4	200	1.56
-1190m	5		3.16
	6		
-3000m	7	∞	3.5

- 浅層ボーリング調査結果(設定手順①)
- 大深度ボーリング調査結果(設定手順②)
- 文献(Iidaka et al.(2008))(設定手順④)
- 探索範囲

2. 地下構造モデルの設定

(7) 設定手順⑤ EL-1.19kmからEL-3kmのS波速度及びP波速度 (2/2)

- EL-1.19kmからEL-3kmの探索結果を下図に示す。
- 地下構造モデルのEL-1.19kmからEL-3kmのS波速度構造 (No.5層及びNo.6層の境界 (EL-1.79km) 及びS波速度 (3.3km/s)) は、この探索結果に基づき設定した。
- また、設定したS波速度に対応するP波速度については、設定したS波速度 (3.3km/s) が大深度ボーリング調査 (D-8.6孔) におけるサスペンション法のVs-Vp関係のデータ (左下図中赤丸) の範囲内であることから、敷地の特性をより反映させるため、このVs-Vp関係のデータの直線近似 (左下図中青線) に基づき設定した。



探索結果

標高EL	No.	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)
-10m	1	98.9	1.50
-108.9m	2	91.1	1.96
-200m	3	790	2.14
-990m	4	200	1.56
-1190m	5	600	3.16
-1790m	6	1,210	3.3
-3000m	7	∞	3.5

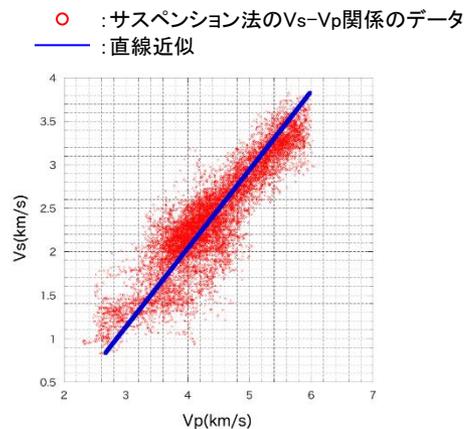
探索範囲

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

微動アレー探索結果に基づき設定した範囲

大深度ボーリング調査結果によるVs-Vp関係に基づき設定した範囲



大深度ボーリング調査 (D-8.6孔) におけるサスペンション法のVs-Vp関係

2. 地下構造モデルの設定

(8) 設定手順⑥ EL-1.79km以深の密度及びEL-1.19km以深の減衰

- 地下構造モデルのEL-1.79km以深の密度及びEL-1.19km以深の減衰は文献に基づき設定した。
- 岩田・関口(2002)は、震源近傍で得られている強震記録と測地データをもとに、2000年鳥取県西部地震の詳細な断層破壊過程及びその震源モデルに基づく震源域強震動を推定し、推定された強震動分布には破壊伝播速度の空間変化等の破壊過程の複雑な要素が強く影響していること等を報告している。岩田・関口(2002)で用いられている地下構造モデル(左上表)は、京都大学防災研究所地震予知センター鳥取地震観測所が震源決定に用いている速度構造を参考とした1次元モデルであり、2000年鳥取県西部地震の震源過程解析及び震源域強震動シミュレーションに用いられており、シミュレーション波形は観測記録とよく対応することが確認されている。
- EL-1.79km以深の密度及びEL-1.19km以深の減衰は、設定した地下構造モデルの速度に概ね対応する岩田・関口(2002)で用いられている地下構造モデル(左上表)の速度の層の密度及び Q_s 値に基づき設定した。なお、EL-1.79km～EL-5.5kmの密度は、一般的に深部ほど密度が大きくなることを踏まえ、EL-1.19km～EL-1.79kmの密度 2.67t/m^3 を下回らないよう設定した。
- なお、岩田・関口(2002)で用いられている地下構造モデル(左上表)の減衰及び密度は、Horikawa(2008)に示される地下構造モデル(京都大学防災研究所による北陸地方の震源決定において採用されている深部の地下構造モデル、左下表)とも整合的である。

京都大学防災研究所地震予知センター鳥取地震観測所
が震源決定に用いている速度構造を参考とした1次元モデル

Top depth of the layer (km)	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (g/cm ³)	Q_p	Q_s
0	5.5	3.18	2.6	400	200
2.	6.1	3.53	2.7	550	270
16.	6.7	3.87	2.8	800	400
38.	7.8	4.51	3.1	1000	500

※ 岩田・関口(2002)より抜粋

京都大学防災研究所による北陸地方の震源決定において
採用されている深部の地下構造モデル

H	V_p	V_s	ρ	Q_p	Q_s
$4 - H_s$	5.5	3.2	2.6	400	200
20	6.1	3.53	2.7	600	300
16	6.65	3.84	2.8	800	400
∞	8.0	4.62	3.2	1000	500

H : Thickness (km), V_p : P-wave velocity (km/s), V_s : S-wave velocity (km/s), ρ : Density (g/cm³), H_s : Net thickness of a sedimentary part (km).

※ Horikawa(2008)より抜粋

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚 (m)	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□: 岩田・関口(2002)に基づき設定した範囲

※ 減衰定数 h は、 $h=1/2Q$ の関係式より算出した。

2. 地下構造モデルの設定

(9) 地下構造モデルの設定結果(1/2)

➤ 敷地の地下構造モデルは、下表の通り、敷地における地盤調査の結果及び文献に基づき一次元の地下構造モデルとして設定した。

設定した地下構造モデル

	標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値	
解放基盤表面 ▽	-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67	↑統計的グリーン関数法↓ 理論的手法
	-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67	
	-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33	
地震基盤 ▽	-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50	
	-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200	
	-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200	
	-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200	
	-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270	
	-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400	
	-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500	

- : 浅層ボーリング調査結果に基づき設定
- : 大深度ボーリング調査結果に基づき設定
- : 浅層ボーリング調査結果及び大深度ボーリング調査結果に対して安全側に設定
- : 微動アレー探査結果に基づき設定
- : 文献に基づき設定

※ 統計的グリーン関数法及び理論的手法に用いる範囲を表の右側に示す。

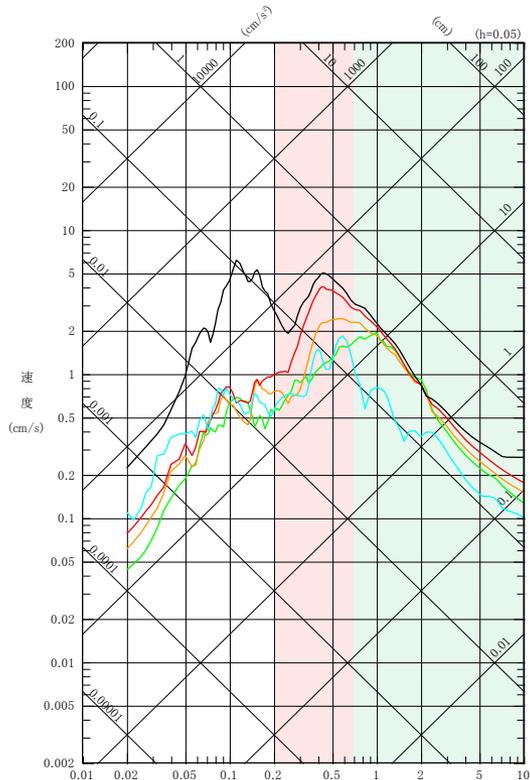
(9) 地下構造モデルの設定結果(2/2)

- 1.3.1項の鉛直アレー地震観測記録(深度別)を用いた検討において確認された敷地地盤の振動特性が地下構造モデルに適切に反映されていることを確認するため、深度別応答スペクトルで増幅がみられた観測点間について、設定した地下構造モデルの伝達関数(EL-10m/EL-100m及びEL-200m/EL-1298m)を確認した。
- 深度別応答スペクトルで増幅がみられた周期帯については、設定した地下構造モデルの伝達関数においても1を上回るピークがみられる。

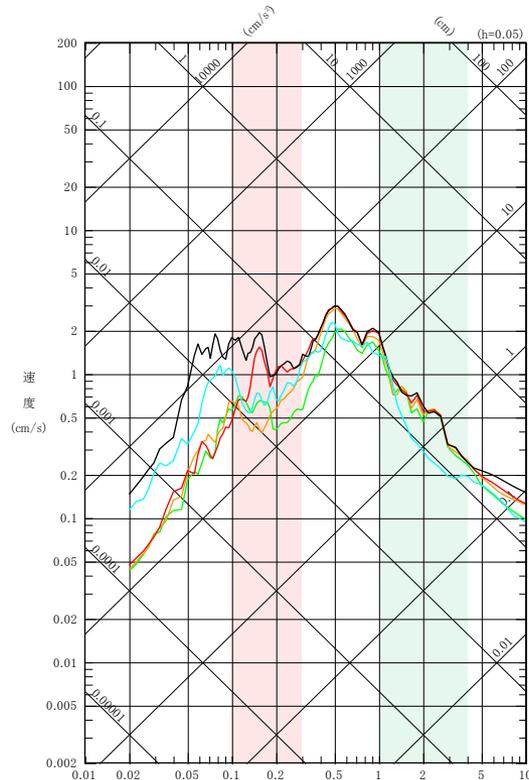
EL-100m～EL-10mにおいて応答が増幅する周期帯

EL-1298m～EL-200mにおいて応答が増幅する周期帯

— EL+19.5m — EL-10m — EL-100m — EL-200m — EL-1298m

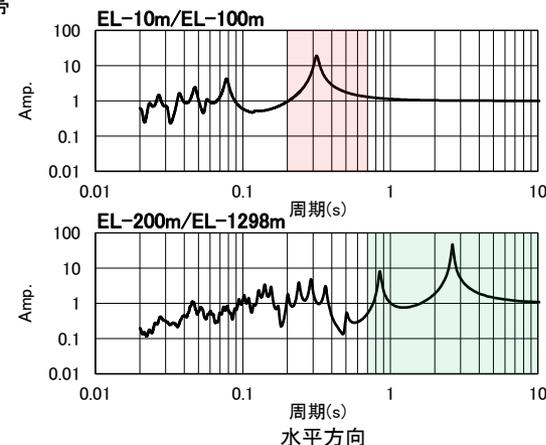


NS方向

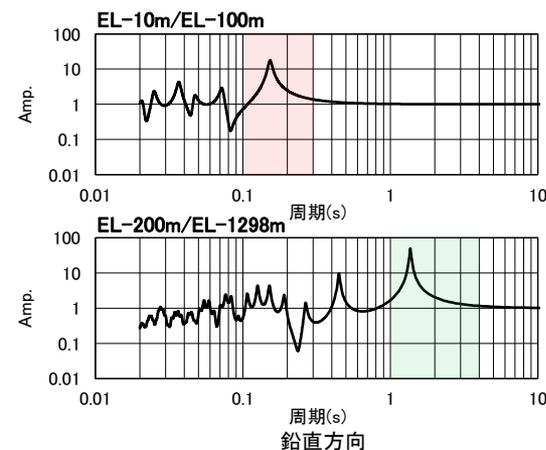


UD方向

深度別の擬似速度応答スペクトル(2020/03/13 石川県能登地方の地震)



水平方向



鉛直方向

設定した地下構造モデルの伝達関数

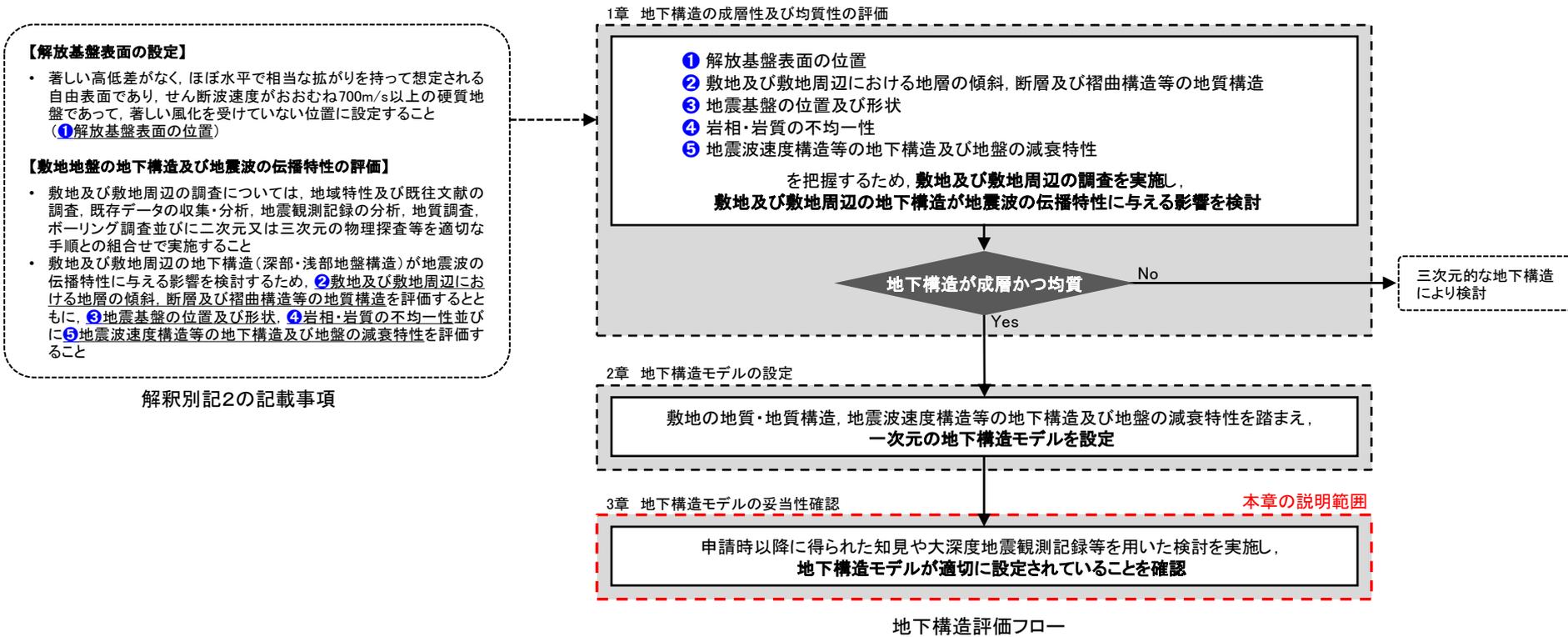
- 1.3.1項の鉛直アレー地震観測記録(深度別)を用いた検討において確認された敷地地盤の振動特性が地下構造モデルに適切に反映されていることを確認した。

3. 地下構造モデルの妥当性確認

3. 地下構造モデルの妥当性確認

(1) 地下構造モデルの妥当性確認の方法

- 2章では、「敷地近傍地下構造調査(精査)」及び「広域地下構造調査(概査)」により把握した敷地の地質・地質構造、地震波速度構造等の地下構造及び地盤の減衰特性を踏まえ、一次元の地下構造モデルを設定した。
- 3章では、下図の地下構造評価フローに基づき、申請時以降に得られた知見や大深度地震観測記録等を用いた検討を実施し、地下構造モデルが適切に設定されていることを確認する。
- 地下構造モデルの妥当性確認の手法等の概要を次頁に示す。



3. 地下構造モデルの妥当性確認

(2) 地下構造モデルの妥当性確認の手法等の概要

- 設定した地下構造モデルの妥当性確認においては、
 - ・ 設定した地下構造モデルの地震基盤から解放基盤表面までの地盤増幅特性を対象として、鉛直アレー地震観測記録を用いた地震動シミュレーション等による地盤増幅特性と比較し、安全側に設定されていること(3.1節で確認)
 - ・ 設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の減衰構造を対象として、設定根拠としているボーリング調査結果(Q値測定結果)以外の検討結果(鉛直アレー地震観測記録や岩石コアを用いた検討結果)と比較し、安全側に設定されていること(3.2節で確認)
 - ・ 設定した地下構造モデルの速度構造を対象として、敷地及び敷地周辺で実施した物理探査結果や申請時以降に得られた知見と比較し、適切に設定されていること(3.3節で確認)
 を確認することにより、地下構造モデル全体として妥当性を確認する。
- 各項目の妥当性確認の手法等の概要を下図に示す。

3.1 地盤増幅特性の妥当性確認

設定した地下構造モデルの地震基盤から解放基盤表面までの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、以下を実施する。

- ・ 敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較する。(3.1.1項)
- ・ 敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地震基盤に対する解放基盤表面の地盤増幅率を比較する。(3.1.2項)

3.2 減衰構造の妥当性確認

設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の減衰構造はボーリング調査結果に対して安全側に設定している。ここでは、地下構造モデルの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、以下を実施する。

- ・ 地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.1項)
- ・ 敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.2項)
- ・ 敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.3項)

3.3 速度構造の妥当性確認

設定した地下構造モデルのEL-3kmより浅部の速度構造は敷地における地盤調査(浅層ボーリング調査、大深度ボーリング調査及び微動アレー探査)の結果に基づき設定し、またEL-3km以深の速度構造は文献に基づき設定している。ここでは、地下構造モデルの速度構造が適切に設定されていることを確認するため、以下を実施する。

- ・ 敷地における微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルに基づく位相速度を比較する。(3.3節(2))
- ・ 敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルに基づく群速度を比較する。(3.3節(3))
- ・ 申請時以降に得られた知見において評価された敷地における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較する。(3.3節(4))

設定した地下構造モデル

標高EL	層厚(m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500



- : 3.1節で確認する範囲
- : 3.2節で確認する範囲
- : 3.3節で確認する範囲

3.1 地盤増幅特性の妥当性確認

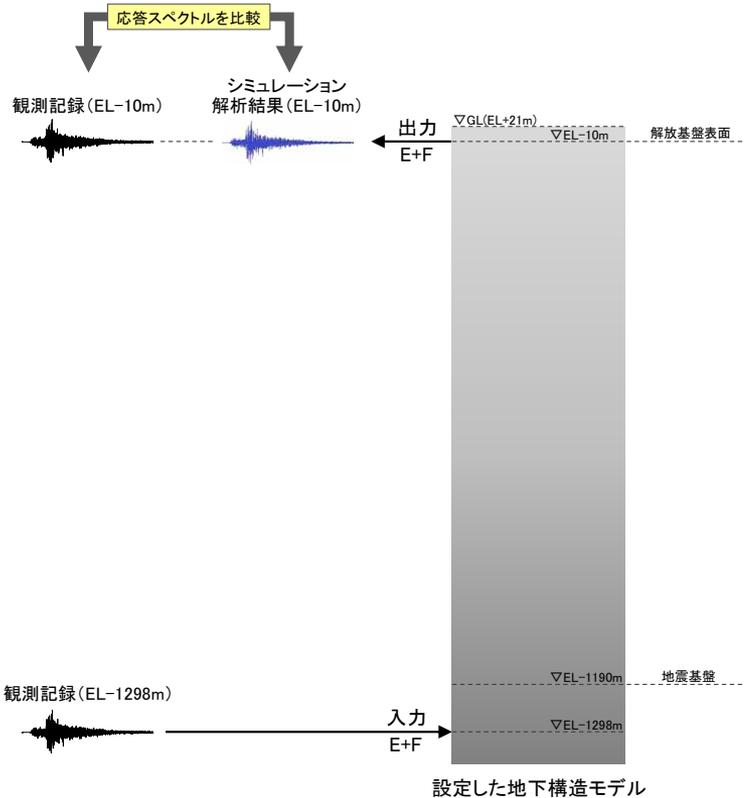
地盤増幅特性の妥当性確認の方針

- 設定した地下構造モデルの地震基盤から解放基盤表面までの地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、以下を実施する。
 - ・ 敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較する。(3.1.1項)
 - ・ 敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地震基盤に対する解放基盤表面の地盤増幅率を比較する。(3.1.2項)

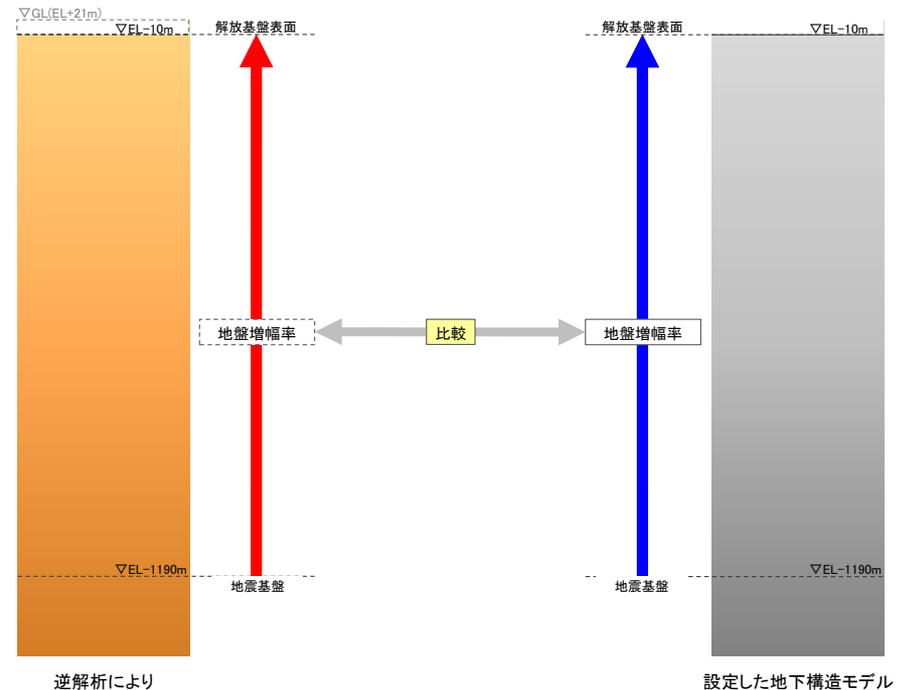
設定した地下構造モデル

解放基盤表面	標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
▽	-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
	-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
	-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
地震基盤	-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
▽	-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
	-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
	-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
	-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
	-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□ : 3.1節で確認する範囲



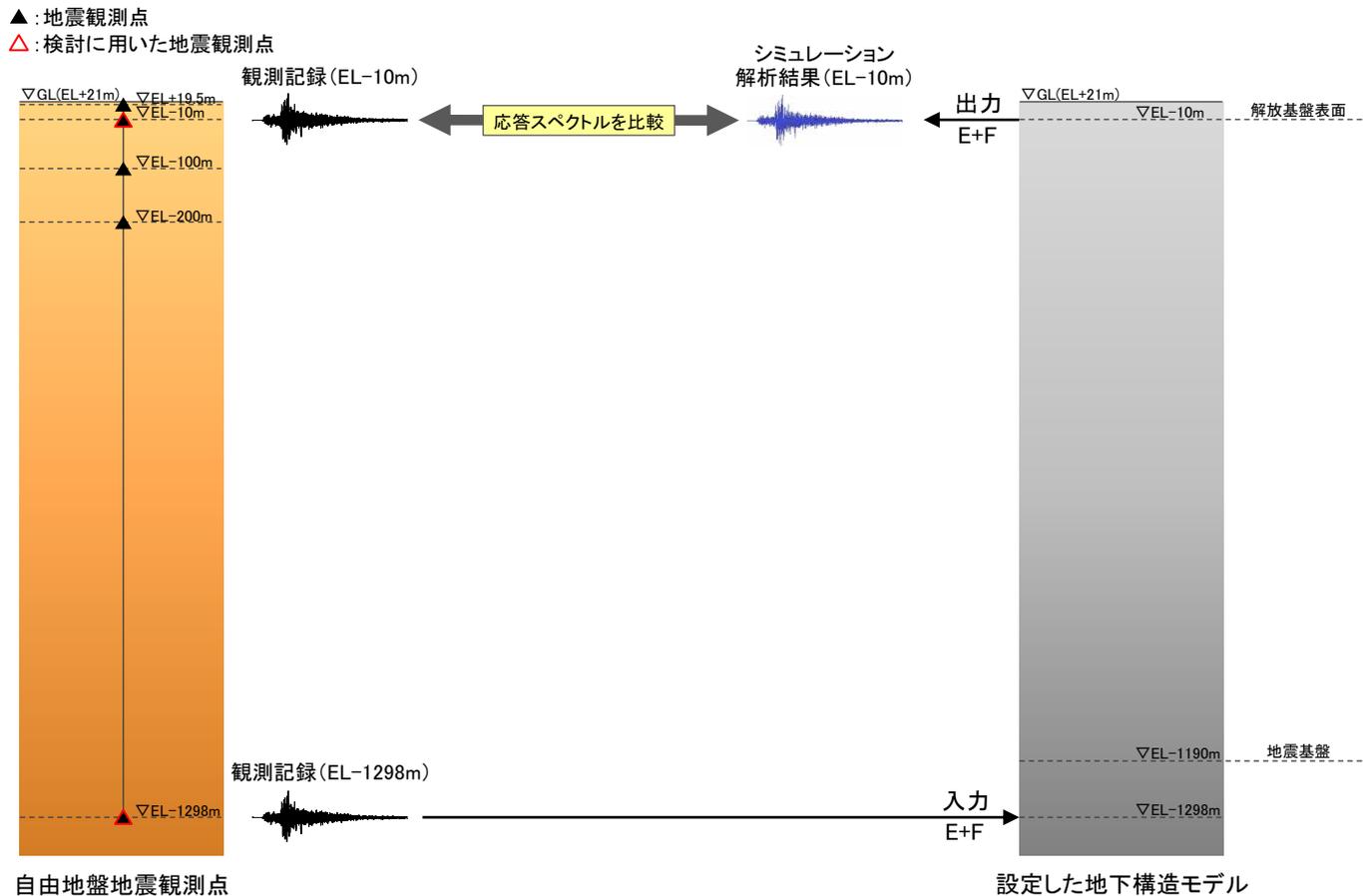
地震動シミュレーションによる地盤増幅特性の検討概要 (3.1.1項)



逆解析による地盤増幅特性の検討概要 (3.1.2項)

(1) 検討方法

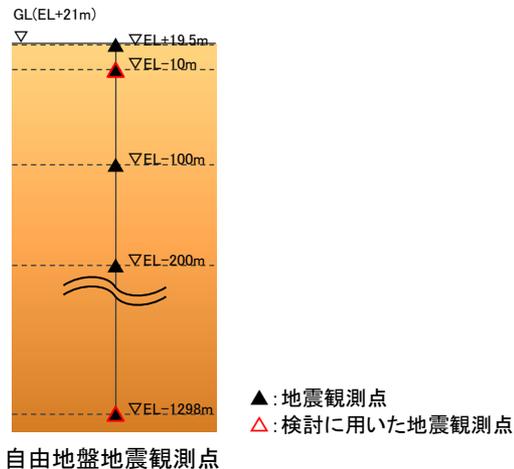
- 設定した地下構造モデルの地震基盤～解放基盤表面の地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較した。
- 地震動シミュレーションは、設定した地下構造モデルのEL-1298mに観測記録を入力し、解放基盤表面を設定した位置(EL-10m)の地震動を評価した。



検討の概要

(2) 検討の対象とした地震

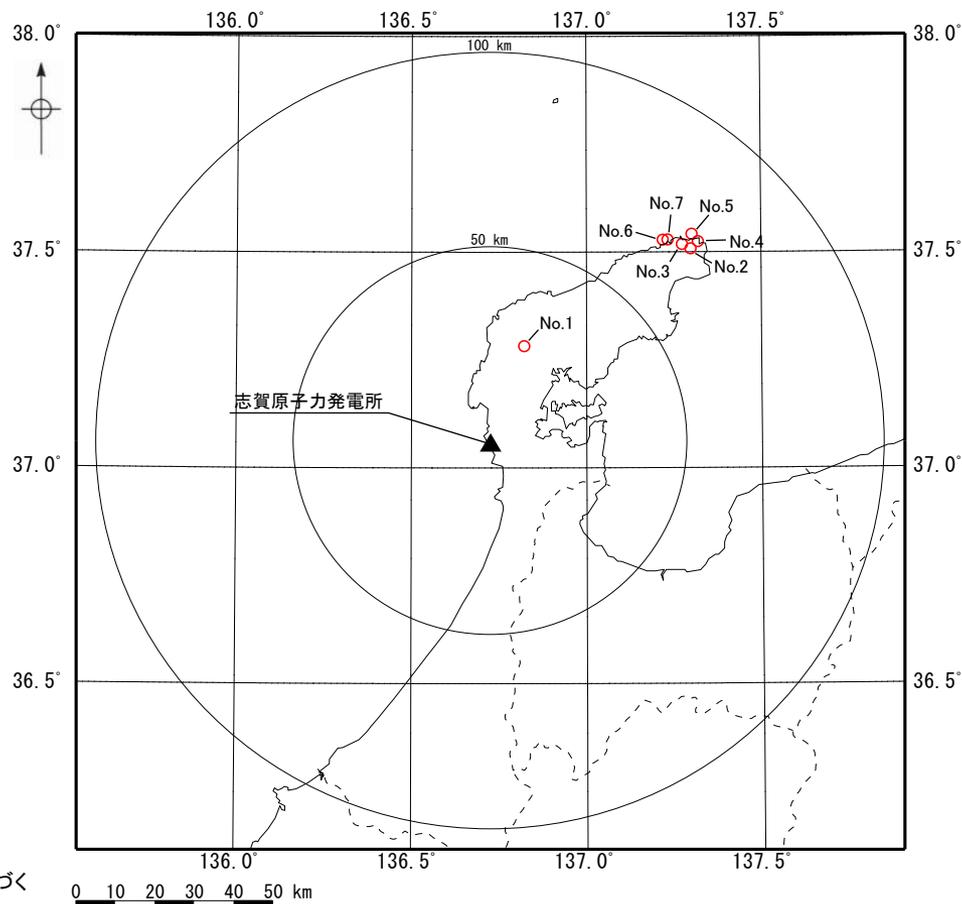
- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。
- 検討の対象は、2019年7月～2023年5月に自由地盤地震観測点におけるEL-1298mとEL-10mで同時に観測された地震のうち、敷地から100km以内において発生したM5以上の7地震とした。



検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
2	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
3	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
4	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
5	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
6	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
7	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

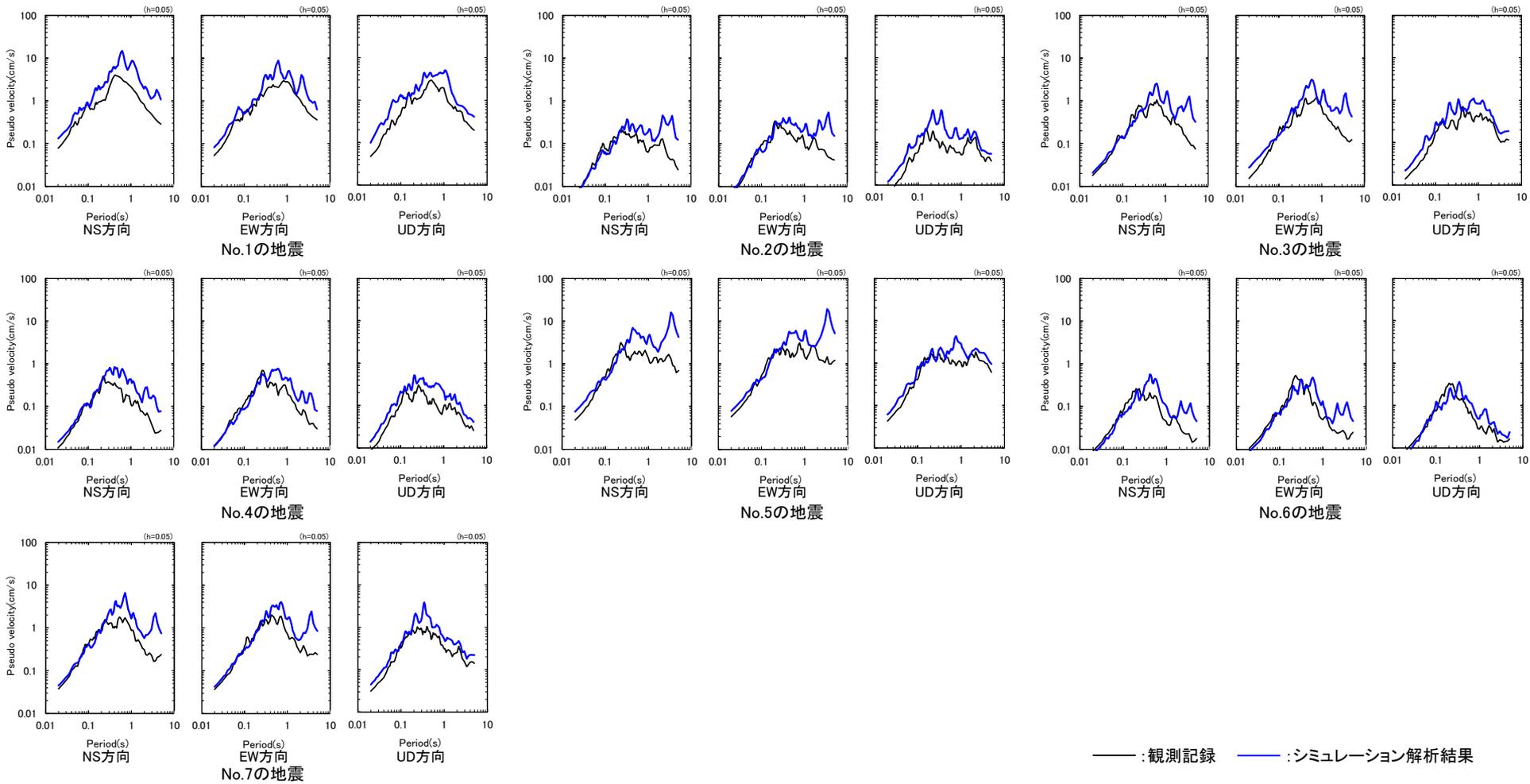
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(3) 検討結果

- シミュレーション解析結果と観測記録を比較した結果を下図に示す。
- いずれの地震についても、シミュレーション解析結果は、観測記録に対して同程度あるいは大きい。



シミュレーション解析結果と観測記録の比較

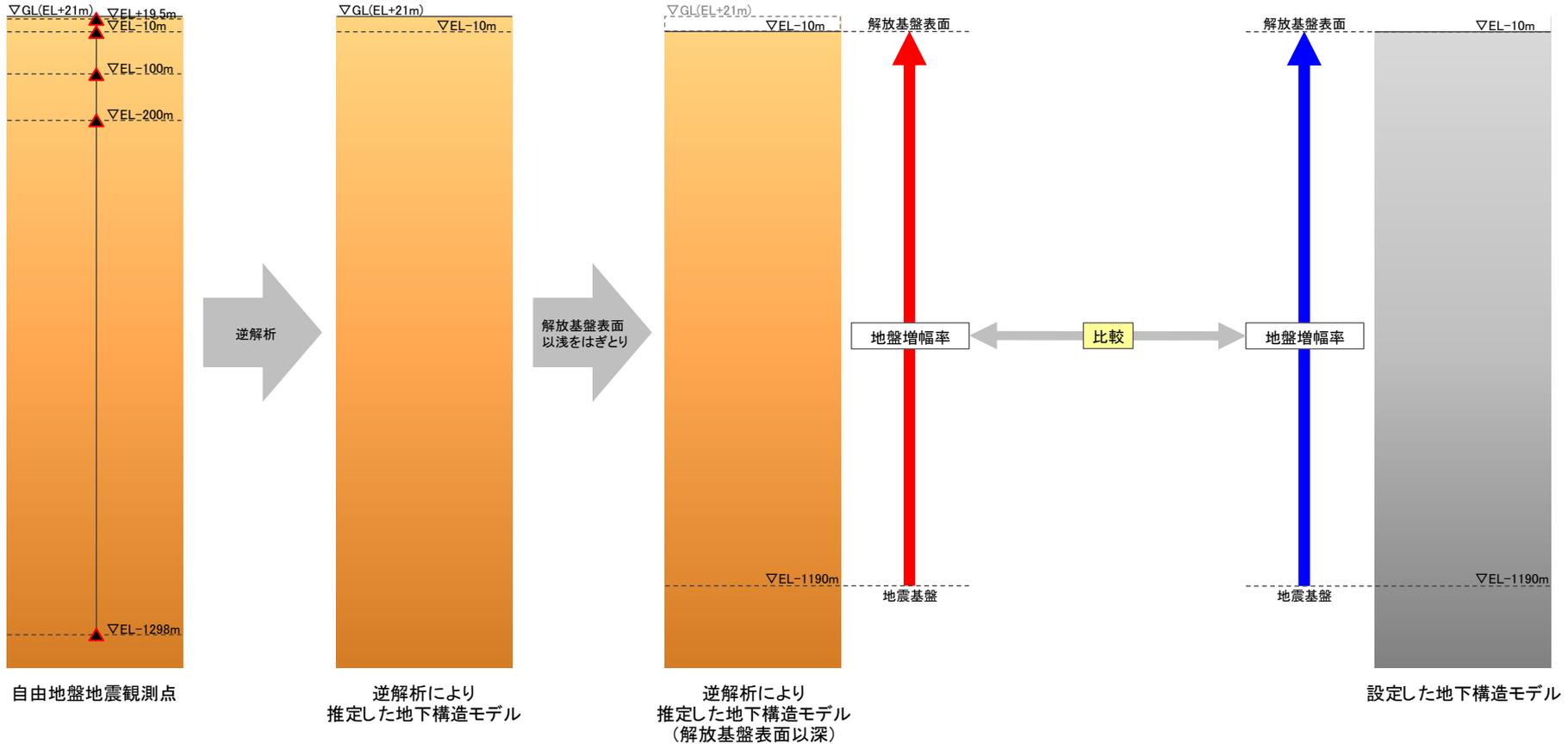
- シミュレーション解析結果は観測記録に対して同程度あるいは大きいことから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.1.2 逆解析による地盤増幅特性の検討

(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルの地震基盤～解放基盤表面の地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地盤増幅率を比較した。
- 逆解析は、自由地盤地震観測点における鉛直アレー地震観測点間の伝達関数を対象として、遺伝的アルゴリズムにより行った。

▲ : 地震観測点
△ : 検討に用いた地震観測点



検討の概要

(2) 初期モデル及び探索範囲

- 初期モデル及び探索範囲を下表に示す。
- 初期モデルのEL-200m以浅の層厚、密度及び速度(EL-4.9m以浅を除く)は自由地盤位置における速度構造及び密度構造(P.182参照)に基づき、またEL-200m以深の層厚、密度及び速度はD-8.6孔における大深度ボーリング調査結果(P.183参照)に基づき設定した。EL-4.9m以深の減衰定数の下限値(h_{min})はQ値測定結果(P.184参照)に基づき設定した。

初期モデル及び探索範囲

	標高EL	No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m^3)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	減衰定数 $h(f)$					
							水平			鉛直		
							h_{min}	h_0	α	h_{min}	h_0	α
▽ 地表	+21.0m	1	1.5	2.20	125~500	198~1580	0.0250	0.01~1	0~2	0.0250	0.01~1	0~2
	+19.5m ▲	2	2.4				~			~		
	+17.1m	3	22				0.1000			0.1000		
▽ 解放基盤表面	-4.9m	4	5.1	1.97	300~1200	685~2740	0.0500	0.01~1	0~2	0.0500	0.01~2	0~2
	-10m ▲	5	90									
	-100m ▲	6	8.9									
	-108.9m	7	91.1	2.37	1500	3190	0.0182	0.01~1	0~2	0.0182	0.01~1	0~2
	-200m ▲	8	790	2.38	1960	3960						
	-990m	9	200	2.34	2140	3920						
▽ 地震基盤	-1190m	10	108	2.41	1560	3260	0.0106	0.01~1	0~2	0.0106	0.01~1	0~2
	-1298m ▲	11	∞	2.67	3160	5290						

$h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$ (ただし、 $h_{min} \leq h(f) \leq 1$)

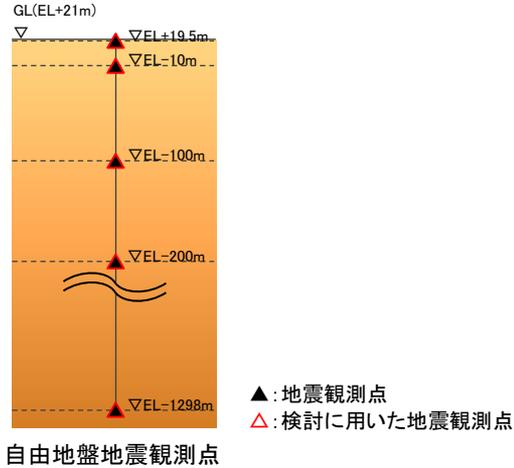
■ : 探索範囲

▲ : 検討に用いた地震観測点

3.1.2 逆解析による地盤増幅特性の検討

(3) 検討の対象とした地震

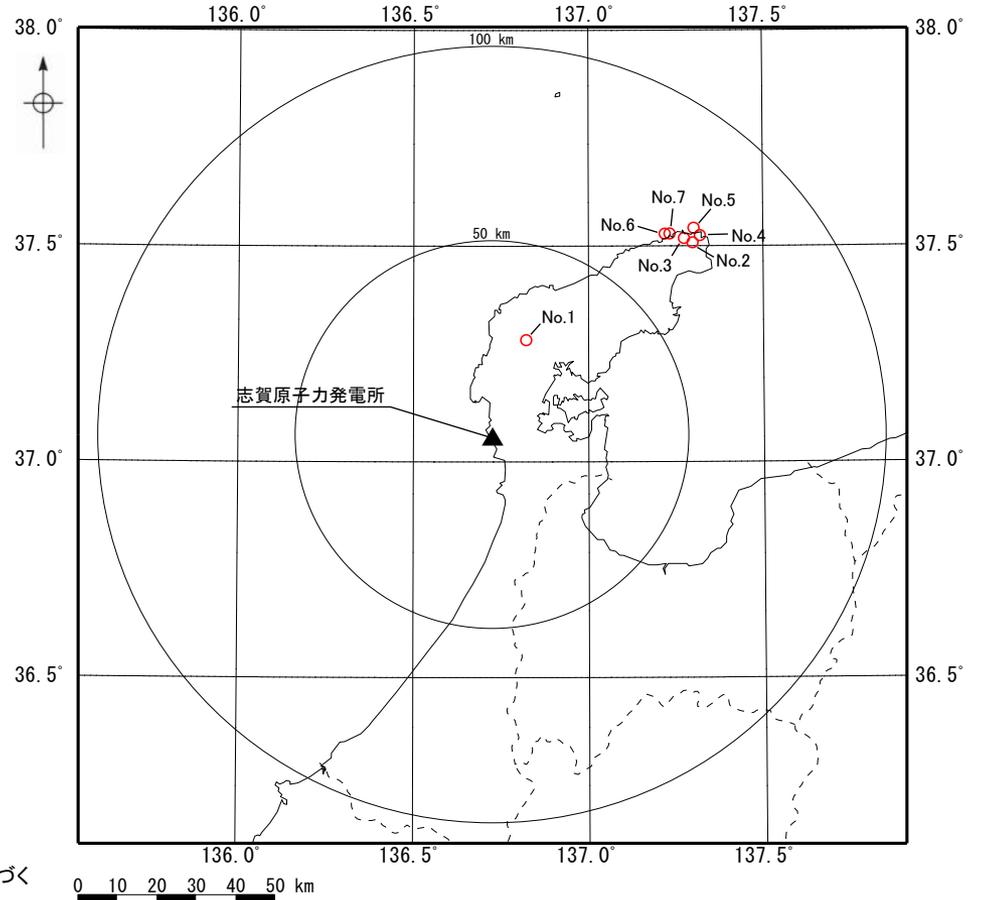
- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。
- 検討の対象は、2019年7月～2023年5月に自由地盤地震観測点における各観測点で同時に観測された地震のうち、敷地から100km以内において発生したM5以上の7地震とした。



検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
2	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
3	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
4	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
5	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
6	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
7	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(4) 逆解析結果(1/2)

- 逆解析により推定した地下構造モデルを下表に示す。
- 観測記録に基づく伝達関数と逆解析により推定した地下構造モデルによる理論伝達関数を比較した結果を次頁に示す。

逆解析により推定した地下構造モデル

	標高EL	No.	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	減衰定数 $h(f)$					
							水平			鉛直		
							h_{min}	h_0	α	h_{min}	h_0	α
▽ 地表	+21.0m	1	1.5	2.20	267	297	0.0365	0.553	1.118	0.0537	0.507	0.644
	+19.5m ▲	2	2.4									
	+17.1m	3	22									
▽ 解放基盤表面	-4.9m	4	5.1	2.37	1500	3190	0.0500	0.464	1.177	0.0500	1.767	1.343
	-10m ▲	5	90									
	-100m ▲	6	8.9									
	-108.9m	7	91.1									
	-200m ▲	8	790									
▽ 地震基盤	-990m	9	200	2.41	1560	3260	0.0182	0.042	1.948	0.0182	0.108	1.225
	-1190m	10	108									
	-1298m ▲	11	∞									

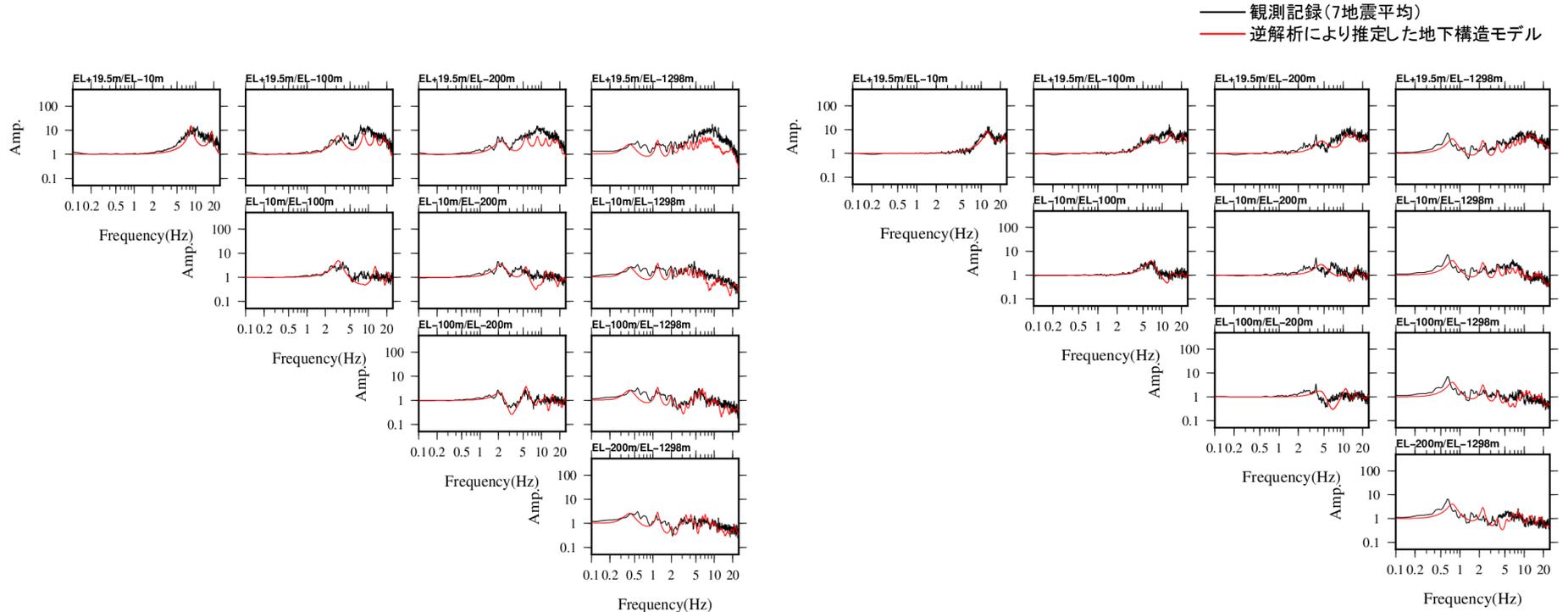
$h(f)=h_0 \times f^{-\alpha}$ (ただし, $h_{min} \leq h(f) \leq 1$)

探索範囲

▲ : 検討に用いた地震観測点

(4) 逆解析結果(2/2)

○ 逆解析により推定した地下構造モデルによる理論伝達関数は観測記録に基づく伝達関数と整合的であることから、逆解析により推定した地下構造モデルは適切に求められているものと考えられる。(初期モデルにおいて設定した層厚、密度、並びにEL-4.9m以深の速度及び減衰定数の下限値(h_{min})についても適切に設定されているものと考えられる。)



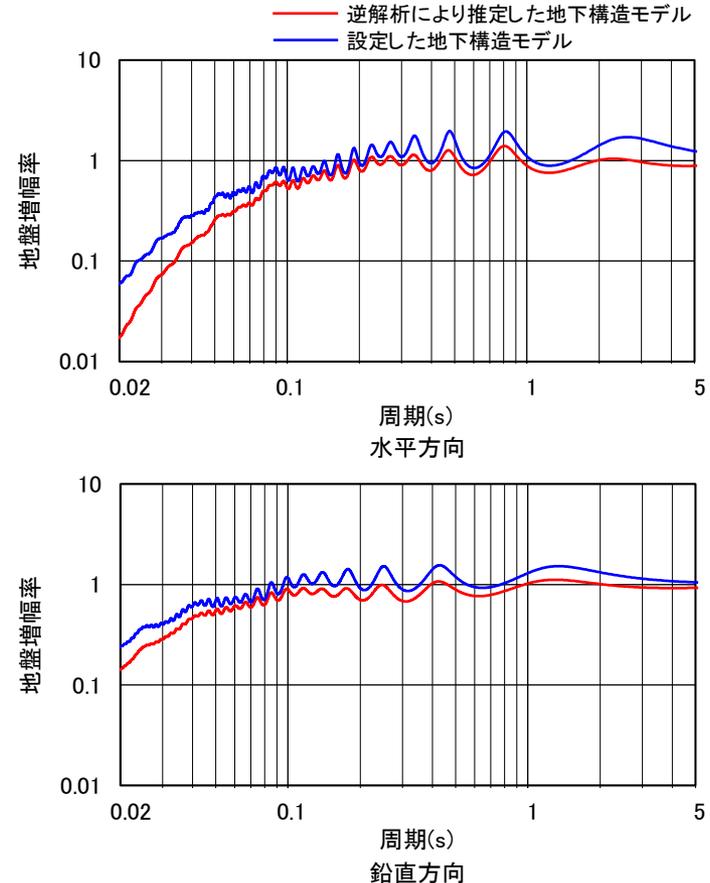
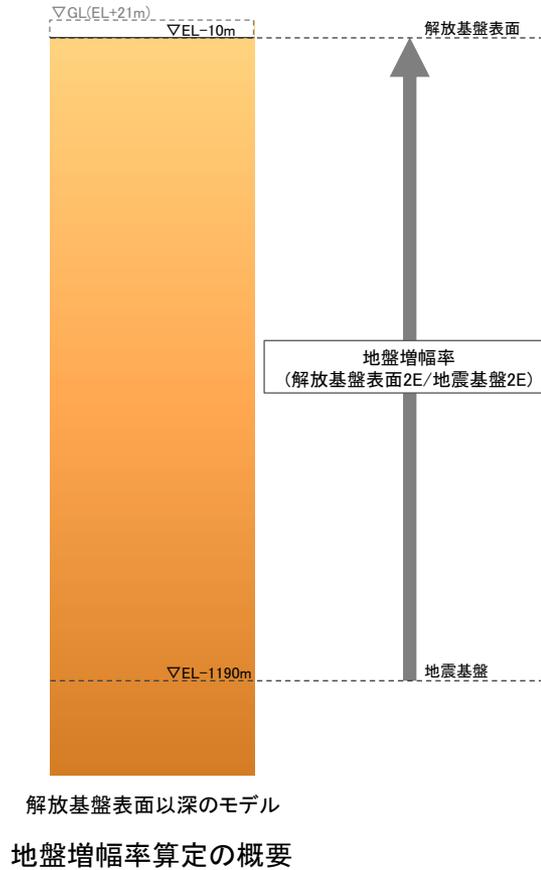
水平方向

鉛直方向

伝達関数

(5) 検討結果

- 逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地震基盤に対する解放基盤表面の地盤増幅率を比較した結果を下図に示す。
- 設定した地下構造モデル(EL-1.19km以浅の減衰をボーリング調査結果による値に対して安全側に設定(詳細はP.184参照))の地盤増幅率は、逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率を上回る。



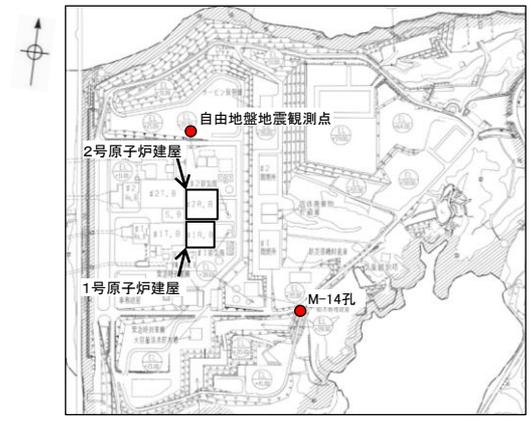
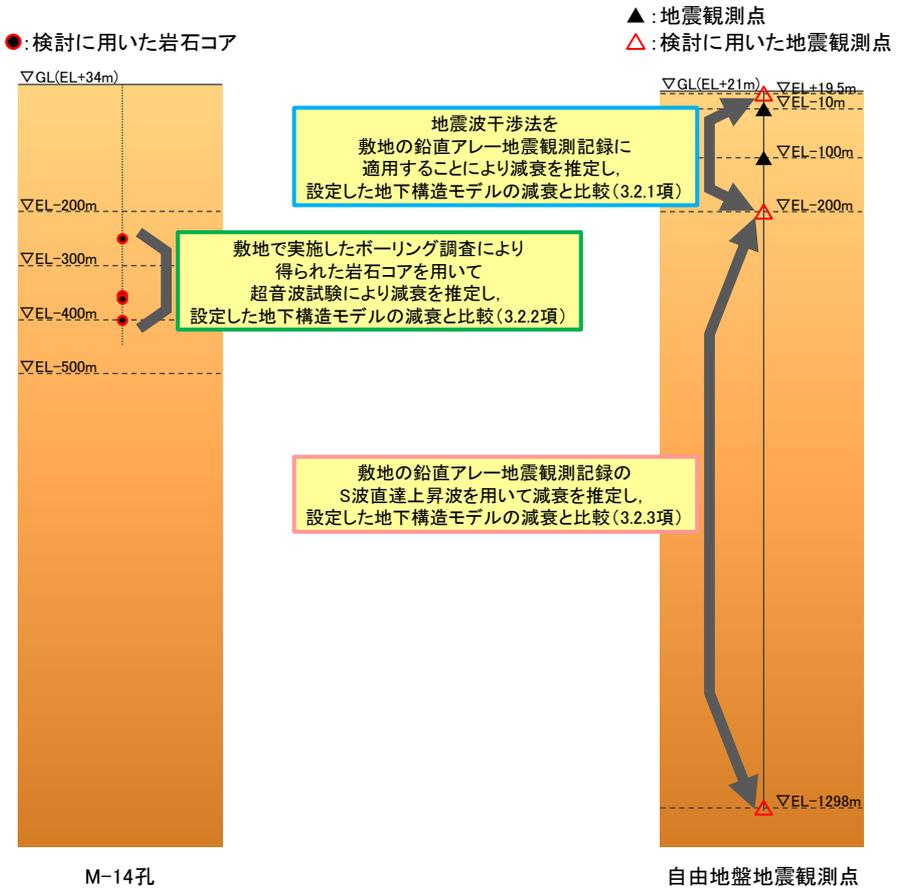
逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率と
設定した地下構造モデルの地盤増幅率の比較

- 設定した地下構造モデルの地盤増幅率は、逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率を上回ることから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.2 減衰構造の妥当性確認

減衰構造の妥当性確認の方針

- 設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の減衰構造はボーリング調査結果に対して安全側に設定している。ここでは、地下構造モデルの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、以下を実施する。
 - ・ 地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.1項)
 - ・ 敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.2項)
 - ・ 敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較する。(3.2.3項)



調査位置図

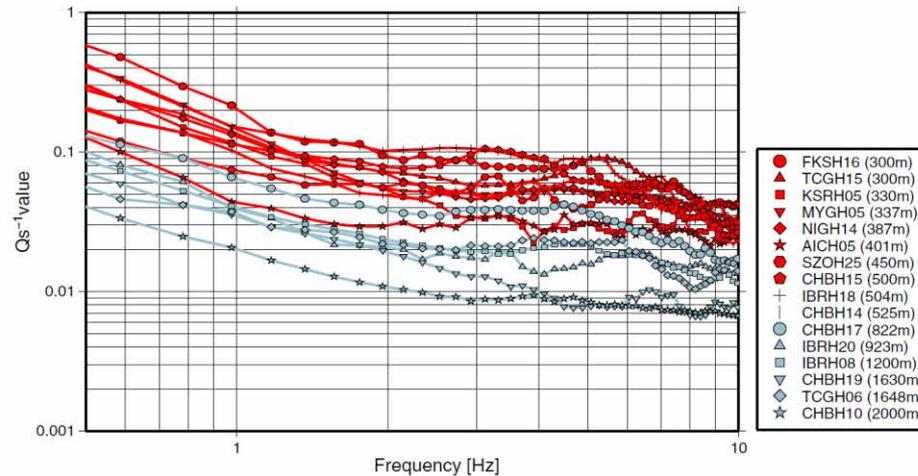
設定した地下構造モデル

解放基盤表面	標高EL	層厚(m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m³)	減衰定数 h (%)	Q値
▽	-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
	-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
地震基盤	-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
▽	-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
	-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
	-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
	-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
	-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
	-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

 : 3.2.1項で確認する範囲
 : 3.2.2項で確認する範囲
 : 3.2.3項で確認する範囲

(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルのEL-10m~EL-200mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、Fukushima et al.(2016)に倣い、地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- Fukushima et al.(2016)は、地震波干渉法を用いて、鉛直アレー地震観測点における地表及び地中地震観測点間の減衰を推定する手法を提案しており、本手法をKiK-netの地震観測記録に適用することにより16観測点における Q_s^{-1} を推定し、推定された Q_s^{-1} は、周波数の増加とともに2~3Hz程度までは減少するが、それ以上の周波数ではほぼ一定になっている。



Fukushima et al.(2016)に示される推定された Q_s^{-1} 値

※ Fukushima et al.(2016)より抜粋

(2) 減衰の推定方法

○ 減衰の推定方法の概要を以下に示す。

1. 地表の地震観測記録に対して地中の地震観測記録をデコンボリューションすることにより入射波と反射波を分離する。デコンボリューション波形のフーリエスペクトル W_ϵ は下式により求める。

$$W_\epsilon(\omega) = \frac{u_b(\omega) u_s^*(\omega)}{|u_s(\omega)|^2 + \epsilon} \quad (1)$$

u_b : 地中記録のフーリエスペクトル
 u_s : 地表記録のフーリエスペクトル
 ϵ : 地表記録のパワースペクトル(平均)の1%
 ω : 角周波数
 *は共役複素数を示す。

2. 複数の地震観測記録について平均したデコンボリューション波形において分離された入射波に対する反射波の伝達関数 H を評価する。

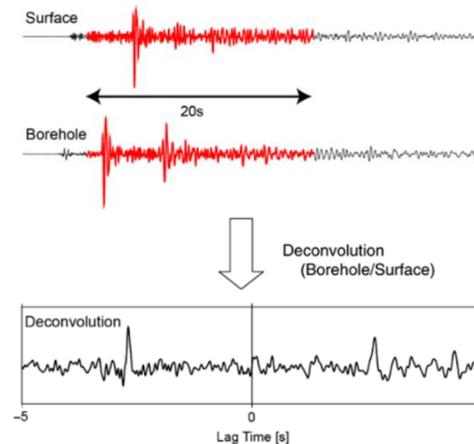
$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (2)$$

S_{xy} : 入射波と反射波のクロススペクトル
 S_{xx} : 入射波のパワースペクトル
 f : 周波数

3. 伝達関数から Q 値を推定する。

$$Q_S^{-1}(f) = -\frac{\ln[H(f)]}{\pi f \tau} \quad (3)$$

τ : 地震観測点間のS波往復走時



Fukushima et al.(2016)に示される地表と地中で得られた観測波形とデコンボリューション波形

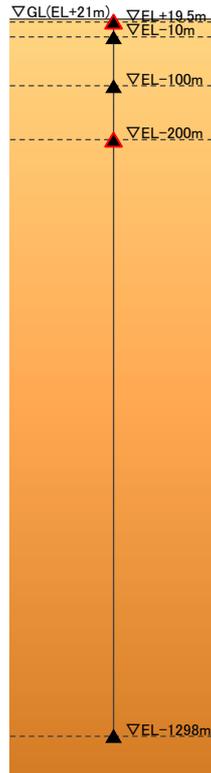
※ Fukushima et al.(2016)より抜粋

3.2.1 地震波干渉法を用いた減衰の検討

(3) 検討の対象とした地震 — 震央分布図 —

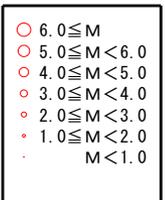
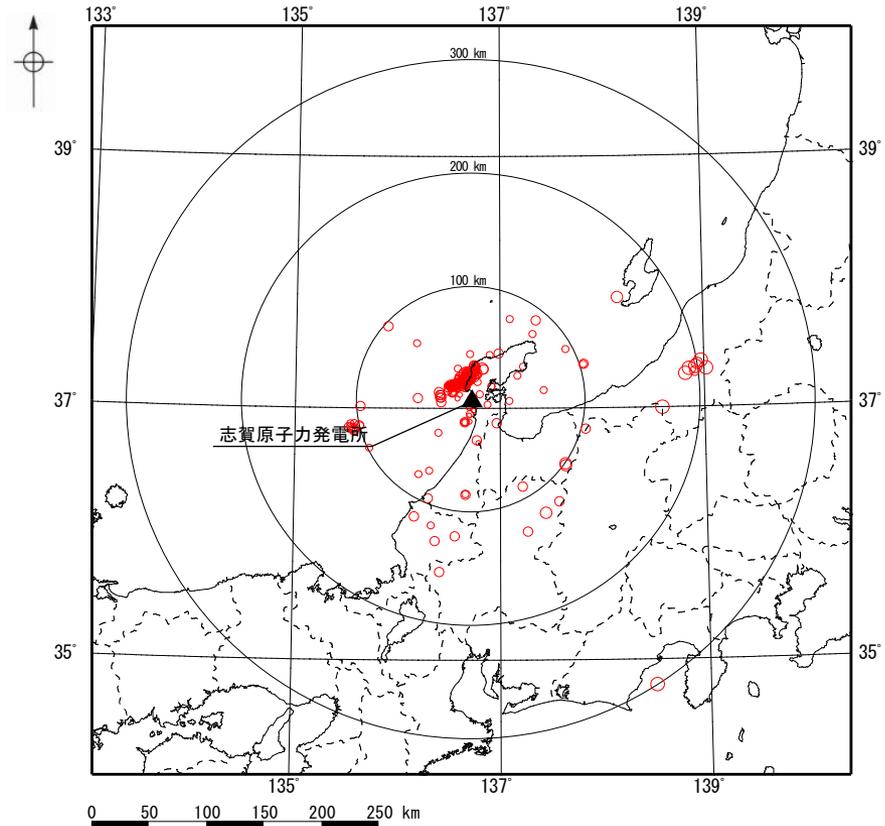
- 検討対象区間は、地震観測記録が多数得られている自由地盤地震観測点におけるEL+19.5m～EL-200mとした。
- 検討の対象とした地震の震央分布図を右下図に示す。検討の対象は、1999年9月～2018年9月に自由地盤地震観測点におけるEL+19.5mとEL-200mで同時に観測された地震のうち、EL+19.5mで最大加速度1cm/s²程度以上が観測された地震を基本とし、表面波が卓越している地震等は除外した286地震とした。

▲: 地震観測点
△: 検討に用いた地震観測点



自由地盤地震観測点

検討に用いた地震観測点



検討の対象とした地震の震央分布図

3.2.1 地震波干渉法を用いた減衰の検討

(3) 検討の対象とした地震 - 地震の諸元 - (1/3)

○ 検討の対象とした地震のうち、検討に用いた地震の諸元を以下に示す*。

検討に用いた地震の諸元 * (1/3)

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」に基づく

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
1	2000/04/07	00:40	37.5058	136.2000	28.49	3.8
2	2000/04/11	18:47	37.4198	136.7212	17.76	3.7
3	2000/06/07	06:27	36.8262	135.5745	16.20	4.0
4	2000/06/07	06:36	36.8418	135.5535	11.19	3.7
5	2000/06/12	04:57	36.8630	135.5523	19.10	3.8
6	2000/06/13	06:44	36.8105	135.5895	19.69	4.3
7	2000/06/17	20:17	36.8158	135.5615	20.56	3.7
8	2000/06/22	20:36	36.8328	135.5383	17.66	4.6
9	2000/07/06	01:58	36.8667	135.5898	19.27	3.8
10	2001/01/22	09:43	37.1975	136.7928	17.69	3.7
11	2001/04/14	20:09	37.0477	137.1045	19.25	3.8
12	2001/06/13	02:51	36.8233	135.5972	20.43	4.5
13	2002/05/24	16:43	37.4560	137.6562	21.16	3.4
14	2002/08/18	09:01	36.1288	136.1772	11.46	4.7
15	2002/09/08	00:11	35.9712	136.5718	9.70	4.2
16	2002/11/15	07:29	36.3055	136.6753	7.64	3.6
17	2002/11/17	13:47	36.3020	136.6735	7.66	4.7
18	2003/02/11	18:34	36.0577	136.3402	5.64	3.9
19	2003/02/22	12:34	36.4932	136.3228	17.04	3.6
20	2003/05/14	23:13	37.2473	137.1840	12.80	3.1
21	2003/06/05	23:14	36.2742	136.3100	12.45	4.1
22	2003/08/10	17:31	36.6718	135.7408	20.89	3.8
23	2003/08/18	14:53	37.3383	137.8337	21.44	4.1
24	2003/08/18	15:10	37.3367	137.8295	20.57	3.9
25	2003/10/05	00:29	36.0073	137.2803	12.56	4.5
26	2003/10/12	15:19	36.8495	135.6380	23.72	4.7
27	2003/10/13	21:46	36.8478	135.6503	26.40	3.3
28	2004/01/26	05:16	37.2762	136.6845	9.65	3.1
29	2004/06/07	13:21	36.9698	136.7570	8.28	2.9
30	2004/09/21	08:43	37.6968	137.1100	13.82	3.6
31	2004/09/25	20:42	36.8822	136.7152	7.48	2.4
32	2004/10/05	08:33	35.9333	136.3782	12.38	4.8
33	2004/10/05	23:49	37.6390	135.9165	0.00	4.5
34	2004/10/23	17:56	37.2925	138.8672	13.08	6.8
35	2004/10/23	18:03	37.3540	138.9833	9.38	6.3
36	2004/10/23	18:11	37.2530	138.8295	11.52	6.0
37	2004/10/23	18:34	37.3063	138.9300	14.17	6.5
38	2004/10/25	06:04	37.3300	138.9468	15.20	5.8
39	2004/10/27	10:40	37.2918	139.0333	11.60	6.1
40	2004/11/06	01:27	36.7138	136.8002	13.28	2.4
41	2005/03/24	20:07	36.3667	137.2303	11.02	4.1
42	2005/03/27	05:20	37.6862	137.3667	14.99	4.1
43	2005/03/31	03:18	37.4113	136.9128	11.31	3.9
44	2006/02/16	23:10	35.6885	136.4227	13.67	4.4
45	2006/03/26	09:44	37.0180	136.8908	12.85	3.9
46	2006/05/04	10:17	37.1325	137.4412	16.30	3.9
47	2006/08/05	02:07	37.3192	137.2397	6.83	3.7
48	2006/10/03	22:42	37.0022	135.6502	30.99	4.6
49	2007/01/08	18:59	37.2668	138.9198	13.34	4.8
50	2007/02/18	09:48	36.7942	136.4107	14.38	3.4

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
51	2007/03/25	10:36	37.1972	136.6995	11.20	4.1
52	2007/03/25	10:43	37.2058	136.7212	10.53	3.0
53	2007/03/25	10:49	37.2007	136.6878	11.61	3.4
54	2007/03/25	11:02	37.2472	136.6788	6.58	3.2
55	2007/03/25	11:19	37.2670	136.7007	6.84	4.2
56	2007/03/25	11:25	37.1993	136.7040	12.02	3.3
57	2007/03/25	11:43	37.2165	136.6927	8.55	3.6
58	2007/03/25	11:51	37.2267	136.7350	11.19	3.5
59	2007/03/25	11:53	37.2383	136.6932	8.89	3.1
60	2007/03/25	11:58	37.2335	136.6178	2.78	4.2
61	2007/03/25	12:40	37.2903	136.7323	8.75	4.0
62	2007/03/25	12:55	37.1840	136.6227	8.70	2.8
63	2007/03/25	13:02	37.2082	136.7180	12.48	3.9
64	2007/03/25	13:23	37.2125	136.6260	5.70	3.4
65	2007/03/25	13:27	37.2282	136.6397	2.84	3.2
66	2007/03/25	13:28	37.1927	136.6203	6.53	3.2
67	2007/03/25	13:31	37.1697	136.5370	2.06	3.1
68	2007/03/25	13:54	37.2200	136.7163	10.82	3.4
69	2007/03/25	13:56	37.2143	136.6877	10.17	3.5
70	2007/03/25	14:03	37.1407	136.6062	8.24	2.3
71	2007/03/25	14:08	37.2065	136.7062	12.50	3.5
72	2007/03/25	14:16	37.2825	136.7627	8.37	3.7
73	2007/03/25	14:18	37.1938	136.6810	9.47	2.6
74	2007/03/25	14:41	37.2303	136.7263	10.09	3.5
75	2007/03/25	14:50	37.2177	136.6473	6.93	2.5
76	2007/03/25	15:13	37.2218	136.7192	9.63	3.2
77	2007/03/25	15:23	37.2142	136.6935	10.42	3.0
78	2007/03/25	15:25	37.1572	136.6850	11.06	3.8
79	2007/03/25	15:26	37.2065	136.6077	4.18	3.7
80	2007/03/25	15:43	37.2940	136.7718	8.90	4.5
81	2007/03/25	15:48	37.2915	136.7790	8.31	3.4
82	2007/03/25	15:57	37.2288	136.7337	11.42	3.8
83	2007/03/25	16:05	37.2145	136.7022	10.88	3.0
84	2007/03/25	16:19	37.2023	136.6110	2.88	2.7
85	2007/03/25	16:29	37.2212	136.6677	6.94	3.1
86	2007/03/25	16:39	37.1587	136.6385	10.33	3.2
87	2007/03/25	16:53	37.2203	136.6657	7.72	3.7
88	2007/03/25	17:08	37.1823	136.6767	10.31	3.4
89	2007/03/25	17:17	37.2353	136.6810	8.18	3.0
90	2007/03/25	17:54	37.2437	136.7302	9.91	3.8
91	2007/03/25	18:11	37.3043	136.8395	13.45	5.3
92	2007/03/25	18:23	37.2982	136.8520	11.91	4.2
93	2007/03/25	18:41	37.2270	136.6088	1.23	3.6
94	2007/03/25	19:02	37.1868	136.6477	10.69	3.5
95	2007/03/25	19:07	37.2012	136.6545	9.46	3.1
96	2007/03/25	19:11	37.1478	136.6377	6.88	2.3
97	2007/03/25	19:16	37.2095	136.6850	9.94	2.7
98	2007/03/25	19:53	37.1722	136.5560	7.13	3.0
99	2007/03/25	21:02	37.2350	136.6530	4.80	3.4
100	2007/03/25	21:26	37.2265	136.6990	9.68	3.4

※ 表に示す地震のうち、各地震のデコンボリューション波形が全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が低い地震(灰色箇所)は、解析の安定性を向上させるため解析の対象から除外した。

3.2.1 地震波干渉法を用いた減衰の検討

(3) 検討の対象とした地震 - 地震の諸元 - (2/3)

検討に用いた地震の諸元 * (2/3)

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」に基づく

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
101	2007/03/25	22:28	37.2453	136.7673	10.42	3.5
102	2007/03/25	22:49	37.2753	136.6982	7.51	3.8
103	2007/03/25	22:55	37.2257	136.7228	10.10	2.9
104	2007/03/25	23:49	37.2383	136.7405	10.74	3.3
105	2007/03/25	23:58	37.2273	136.7268	9.81	2.8
106	2007/03/26	00:21	37.2185	136.6508	5.58	3.6
107	2007/03/26	00:55	37.1587	136.5948	6.23	2.8
108	2007/03/26	00:58	37.2410	136.6678	5.71	2.5
109	2007/03/26	01:10	37.1723	136.6195	8.58	2.3
110	2007/03/26	01:35	37.1777	136.6550	9.97	2.6
111	2007/03/26	02:14	37.1578	136.6695	11.96	4.2
112	2007/03/26	02:25	37.1838	136.5938	6.95	3.7
113	2007/03/26	02:34	37.2102	136.7128	11.98	3.5
114	2007/03/26	03:02	37.2285	136.6845	7.98	2.6
115	2007/03/26	03:21	37.2345	136.7445	11.13	3.6
116	2007/03/26	03:32	37.2723	136.7765	11.66	3.2
117	2007/03/26	04:01	37.1457	136.5717	8.82	2.7
118	2007/03/26	04:09	37.1783	136.5787	8.16	3.0
119	2007/03/26	04:36	37.2178	136.6312	5.82	3.1
120	2007/03/26	06:00	37.2305	136.7317	10.07	2.6
121	2007/03/26	06:46	37.2975	136.7705	10.08	3.4
122	2007/03/26	07:11	37.2347	136.7413	11.27	3.3
123	2007/03/26	07:22	37.1693	136.5117	7.29	3.6
124	2007/03/26	07:49	37.1637	136.5193	5.11	3.5
125	2007/03/26	07:56	37.1672	136.5302	6.60	2.8
126	2007/03/26	08:39	37.1508	136.5330	7.28	3.2
127	2007/03/26	09:48	37.1682	136.5635	0.00	3.2
128	2007/03/26	09:52	37.2363	136.7088	8.89	3.3
129	2007/03/26	09:55	37.2313	136.6435	0.48	3.3
130	2007/03/26	11:27	37.1798	136.5400	6.64	3.1
131	2007/03/26	11:31	37.2122	136.6860	9.75	2.4
132	2007/03/26	11:58	37.2183	136.7320	13.58	3.6
133	2007/03/26	12:05	37.2410	136.6783	6.79	3.6
134	2007/03/26	12:47	37.1605	136.6862	10.25	2.6
135	2007/03/26	13:05	37.1992	136.6440	8.87	2.9
136	2007/03/26	13:47	37.2703	136.6570	4.30	4.4
137	2007/03/26	14:42	37.1712	136.5305	2.51	3.5
138	2007/03/26	15:25	37.2552	136.7163	9.24	3.4
139	2007/03/26	15:50	37.1208	136.5005	3.41	3.3
140	2007/03/26	16:41	37.2353	136.6785	8.12	3.5
141	2007/03/26	17:58	37.2325	136.7342	10.17	3.1
142	2007/03/26	18:02	37.2762	136.7007	5.91	4.6
143	2007/03/26	18:26	37.1935	136.6602	10.03	3.6
144	2007/03/26	18:35	37.1630	136.5608	8.44	3.6
145	2007/03/26	18:37	37.1607	136.5617	8.41	3.0
146	2007/03/26	19:26	37.2042	136.6857	9.71	2.8
147	2007/03/26	20:13	37.2383	136.7275	10.32	3.2
148	2007/03/26	21:04	37.1993	136.6122	6.89	3.6
149	2007/03/26	21:30	37.1863	136.6473	9.55	3.9
150	2007/03/26	21:42	37.2618	136.7047	6.96	3.9

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
151	2007/03/26	22:11	37.1868	136.5630	1.65	3.0
152	2007/03/26	22:36	37.2547	136.7982	12.15	3.3
153	2007/03/26	23:05	37.1600	136.5217	9.19	3.2
154	2007/03/26	23:55	37.2388	136.6703	8.28	3.4
155	2007/03/27	01:59	37.2947	136.7658	9.03	3.9
156	2007/03/27	02:51	37.1833	136.6605	11.10	2.5
157	2007/03/27	03:09	37.1737	136.6550	11.01	2.3
158	2007/03/27	06:48	37.1802	136.5483	5.44	3.6
159	2007/03/27	07:16	37.1143	136.5472	6.82	4.1
160	2007/03/27	07:35	37.1095	136.5505	4.34	3.1
161	2007/03/27	07:58	37.1105	136.5578	0.00	2.8
162	2007/03/27	08:32	37.2013	136.7315	10.96	2.9
163	2007/03/27	09:38	37.2158	136.6868	9.03	3.1
164	2007/03/27	09:42	37.2607	136.6877	6.24	3.5
165	2007/03/27	11:27	37.2017	136.6677	11.69	2.8
166	2007/03/27	11:33	37.2267	136.6793	7.43	3.8
167	2007/03/27	12:28	37.2430	136.7492	10.63	3.8
168	2007/03/27	16:40	37.1768	136.6485	10.15	2.4
169	2007/03/27	20:11	37.2183	136.6840	10.12	3.3
170	2007/03/27	22:12	37.0967	136.6192	0.00	2.7
171	2007/03/27	23:04	37.1767	136.6183	8.11	3.5
172	2007/03/28	00:57	37.2510	136.7215	9.89	4.0
173	2007/03/28	08:08	37.2223	136.7088	13.29	4.9
174	2007/03/28	10:16	37.1887	136.6582	9.33	2.6
175	2007/03/28	11:34	37.1738	136.6177	8.82	2.5
176	2007/03/28	13:05	37.2820	136.6832	6.79	4.7
177	2007/03/28	14:36	37.2760	136.6782	6.97	3.5
178	2007/03/28	19:34	37.2303	136.7328	10.02	2.5
179	2007/03/28	21:14	37.2340	136.6855	8.59	2.9
180	2007/03/28	21:16	37.1903	136.5823	6.10	3.8
181	2007/03/28	22:11	37.1912	136.7118	11.55	2.9
182	2007/03/28	23:54	37.2477	136.6823	7.06	3.2
183	2007/03/29	00:15	37.2507	136.7848	11.51	3.3
184	2007/03/29	03:17	37.1610	136.6705	10.55	3.2
185	2007/03/29	03:39	37.2243	136.7048	9.75	2.8
186	2007/03/29	04:32	37.2457	136.7000	7.96	3.4
187	2007/03/29	09:06	37.1838	136.6515	9.57	2.3
188	2007/03/29	09:34	37.1868	136.5962	2.68	2.3
189	2007/03/29	10:46	37.2297	136.6888	8.31	3.8
190	2007/03/29	15:34	37.1782	136.6275	10.83	3.5
191	2007/03/29	19:27	37.1903	136.6463	10.83	2.7
192	2007/03/30	02:05	37.2265	136.7278	11.39	3.5
193	2007/03/30	02:48	37.2018	136.6653	9.71	2.7
194	2007/03/30	04:58	37.1112	136.5505	0.67	3.2
195	2007/03/30	14:04	37.3042	136.5998	8.31	3.7
196	2007/03/30	15:57	37.2447	136.7453	9.83	3.1
197	2007/03/31	08:09	37.2347	136.7598	13.47	4.4
198	2007/03/31	10:27	37.2195	136.6482	6.17	3.2
199	2007/03/31	13:17	37.1920	136.6612	9.98	2.7
200	2007/03/31	15:34	37.2397	136.6897	6.35	3.3

※ 表に示す地震のうち、各地震のデコンボリューション波形が全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が低い地震(灰色箇所)は、解析の安定性を向上させるため解析の対象から除外した。

3.2.1 地震波干渉法を用いた減衰の検討

(3) 検討の対象とした地震 - 地震の諸元 - (3/3)

検討に用いた地震の諸元 * (3/3)

* 気象庁「地震月報(カタログ編)」に基づく

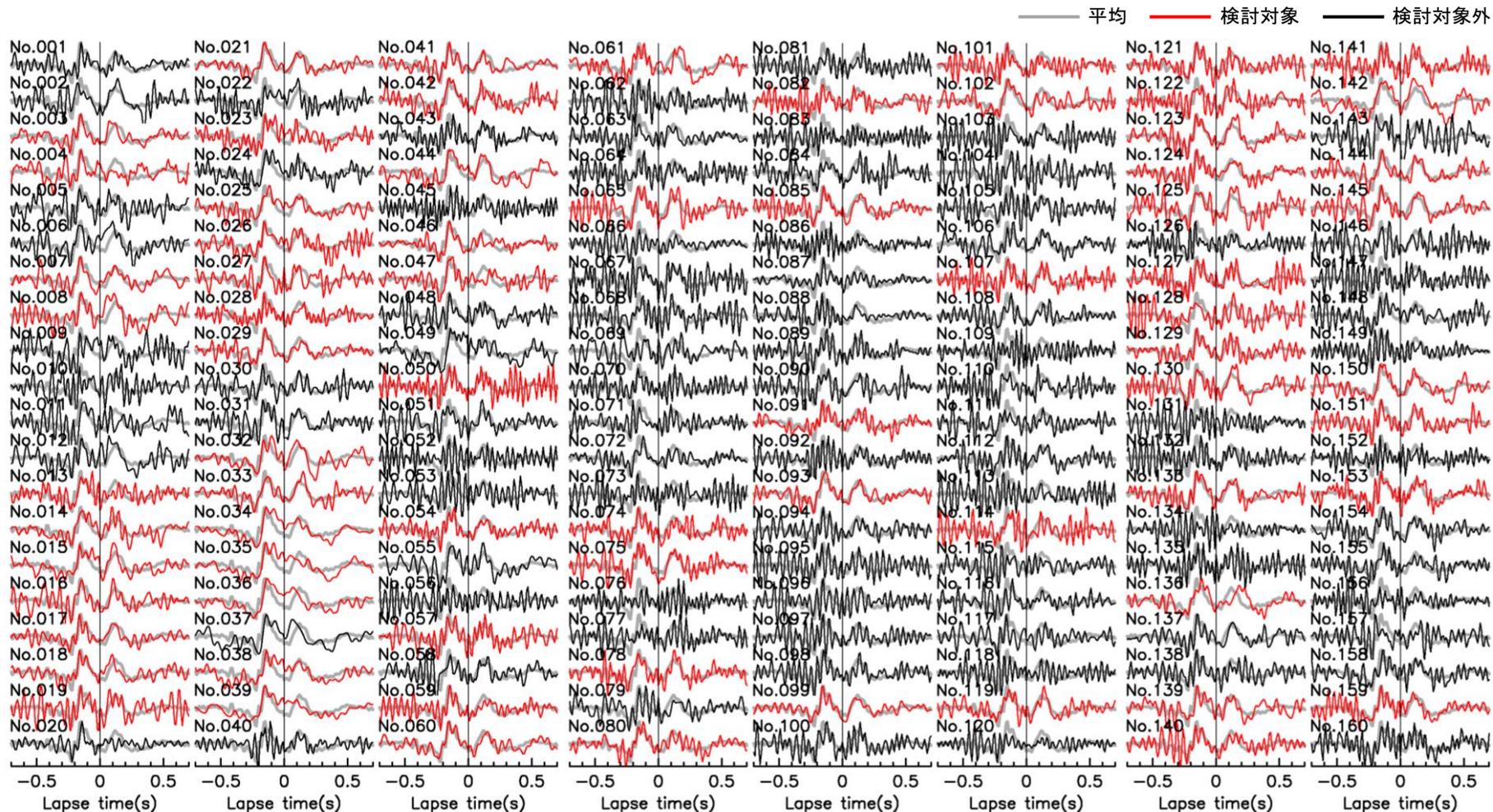
No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
201	2007/03/31	20:32	37.1905	136.5962	5.73	2.6
202	2007/03/31	22:37	37.1628	136.6873	10.19	2.3
203	2007/03/31	23:58	37.1440	136.5983	8.68	2.8
204	2007/04/01	00:03	37.1548	136.5867	7.65	2.2
205	2007/04/01	01:44	37.2382	136.6980	9.26	3.0
206	2007/04/01	10:25	37.2203	136.6010	3.20	3.4
207	2007/04/01	14:54	37.2367	136.7335	10.25	2.9
208	2007/04/02	02:51	37.2105	136.6898	12.41	4.2
209	2007/04/02	08:01	37.2073	136.6468	6.99	4.1
210	2007/04/02	14:33	37.2438	136.7423	10.30	3.0
211	2007/04/02	17:25	37.2203	136.6478	5.05	3.2
212	2007/04/02	21:28	37.2063	136.6407	8.10	2.9
213	2007/04/05	15:14	37.0735	136.4387	8.33	4.3
214	2007/04/06	15:18	37.2673	136.7902	11.68	4.3
215	2007/04/06	21:42	37.0955	136.4252	6.82	4.7
216	2007/04/06	23:55	37.0922	136.4342	6.72	4.3
217	2007/04/10	00:55	37.1673	136.5450	7.47	3.2
218	2007/04/10	21:19	37.1478	136.5823	9.20	2.9
219	2007/04/11	22:11	37.0742	136.4268	8.20	4.3
220	2007/04/12	16:24	37.2248	136.7413	10.01	3.0
221	2007/04/13	01:06	37.2300	136.6870	8.17	3.3
222	2007/04/13	09:02	37.1687	136.5165	0.00	3.7
223	2007/04/14	10:25	37.1790	136.6102	9.82	2.9
224	2007/04/14	18:19	37.1587	136.6808	11.24	3.0
225	2007/04/16	15:29	37.1802	136.5553	0.47	4.0
226	2007/04/26	11:30	37.2342	136.7443	10.90	3.9
227	2007/05/02	20:44	37.3307	136.7628	6.59	4.7
228	2007/05/04	14:08	37.1908	136.6578	10.28	3.1
229	2007/05/05	18:22	37.1608	136.6712	11.28	2.9
230	2007/05/07	02:13	37.2748	136.7637	8.95	3.4
231	2007/05/12	13:42	37.1683	136.5023	5.78	3.8
232	2007/05/13	03:01	37.1762	136.6095	10.18	2.9
233	2007/06/08	03:17	37.2245	136.6762	7.75	3.4
234	2007/06/22	03:34	36.8780	136.6677	7.50	4.6
235	2007/06/22	16:47	36.8777	136.6648	6.33	3.0
236	2007/06/26	20:04	36.8768	136.6748	7.84	3.4
237	2007/07/09	16:00	37.3243	136.7580	10.04	4.2
238	2007/07/17	10:58	37.1837	136.5212	0.00	3.5
239	2007/07/20	08:58	37.0372	136.4387	9.29	4.1
240	2007/07/28	06:30	37.1578	136.5498	8.19	3.3
241	2007/08/02	16:03	37.1735	136.6245	10.55	3.1
242	2007/08/16	18:52	37.0703	136.7162	2.50	0.7
243	2007/09/20	20:05	37.1485	136.4970	8.94	3.9
244	2007/12/18	02:53	37.2365	136.7477	9.22	3.9
245	2008/01/22	16:20	37.3202	136.7693	11.70	4.0
246	2008/01/22	16:22	37.3178	136.7792	11.05	3.6
247	2008/01/26	04:33	37.3188	136.7733	11.30	4.8
248	2008/02/05	12:52	37.1827	136.6557	10.60	2.8
249	2008/03/17	07:00	37.0693	136.2100	7.06	4.5
250	2008/03/20	00:05	37.1612	136.5595	9.94	3.3

No.	震源情報					
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M
251	2008/04/16	18:46	37.1178	136.4163	8.24	4.1
252	2008/04/29	06:58	37.2325	136.7308	10.91	3.8
253	2008/05/02	05:46	37.2347	136.6207	3.78	4.0
254	2008/06/28	11:36	37.1858	136.6510	10.65	3.0
255	2008/07/15	10:44	37.1452	136.5930	9.82	3.1
256	2008/07/15	14:41	37.1470	136.5913	10.35	3.9
257	2008/07/27	10:53	37.0998	136.8142	2.08	3.2
258	2009/05/23	05:15	37.1438	136.5355	10.91	3.9
259	2009/08/11	05:07	34.7862	138.4993	23.32	6.5
260	2010/10/31	06:58	36.9732	136.7580	9.21	2.3
261	2011/02/27	05:38	36.1563	137.4547	4.34	5.5
262	2011/03/12	03:59	36.9860	138.5978	8.38	6.7
263	2011/03/21	13:15	36.2480	137.5852	3.31	4.8
264	2011/10/05	18:59	36.5328	137.6502	0.68	5.4
265	2011/10/05	19:06	36.5488	137.6473	0.00	5.2
266	2011/12/08	01:12	37.5777	137.3338	9.82	3.9
267	2012/02/08	21:01	37.8653	138.1708	13.62	5.7
268	2012/05/28	15:31	37.4238	137.0007	12.85	4.0
269	2012/11/16	15:57	37.1613	136.5583	9.50	3.6
270	2013/04/04	01:58	36.7340	136.7850	12.93	4.2
271	2013/09/07	12:56	37.1630	136.6748	9.92	2.8
272	2013/10/14	05:28	36.9935	136.7050	8.87	2.3
273	2014/09/27	00:35	37.2377	136.6780	8.30	4.1
274	2014/11/16	17:37	37.2093	136.7325	10.10	3.1
275	2015/01/12	18:09	37.0672	136.5980	10.36	2.8
276	2015/04/21	05:15	36.9450	136.7195	7.58	3.1
277	2015/05/28	10:41	37.0725	136.7092	5.87	1.2
278	2016/07/01	08:04	36.8227	137.8457	0.00	4.6
279	2016/08/20	08:14	37.2592	136.6910	8.17	3.9
280	2017/04/01	19:43	37.3132	136.7688	5.11	3.6
281	2017/11/09	11:38	37.1642	136.9295	15.85	3.5
282	2017/11/09	12:23	37.1645	136.9287	15.72	3.7
283	2017/12/31	02:56	37.0820	136.7733	9.10	1.9
284	2018/01/05	11:02	36.8712	136.9803	13.65	4.0
285	2018/03/06	01:26	36.4650	136.2205	14.72	3.7
286	2018/09/29	05:22	36.9305	136.7102	5.60	2.1

※ 表に示す地震のうち、各地震のデコンボリューション波形が全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が低い地震(灰色箇所)は、解析の安定性を向上させるため解析の対象から除外した。

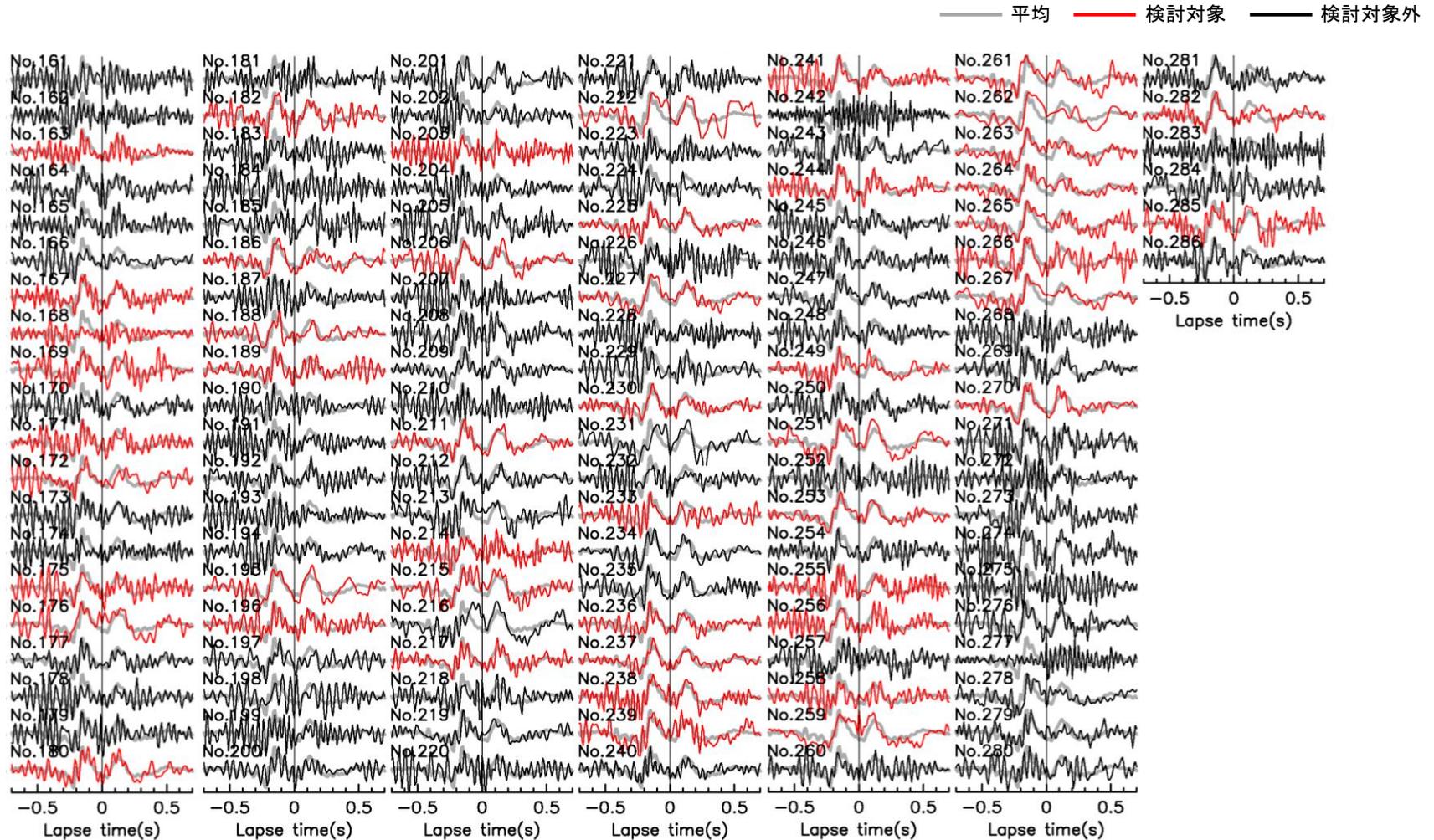
(4) デコンボリューション波形の評価結果(1/2)

- 評価したデコンボリューション波形を下図に示す。
- 減衰の推定にあたっては、解析の安定性を向上させるため、全地震のデコンボリューション波形の平均と相関が高いデコンボリューション波形を用いた。



全地震のデコンボリューション波形の平均と各地震のデコンボリューション波形の相関(1/2)

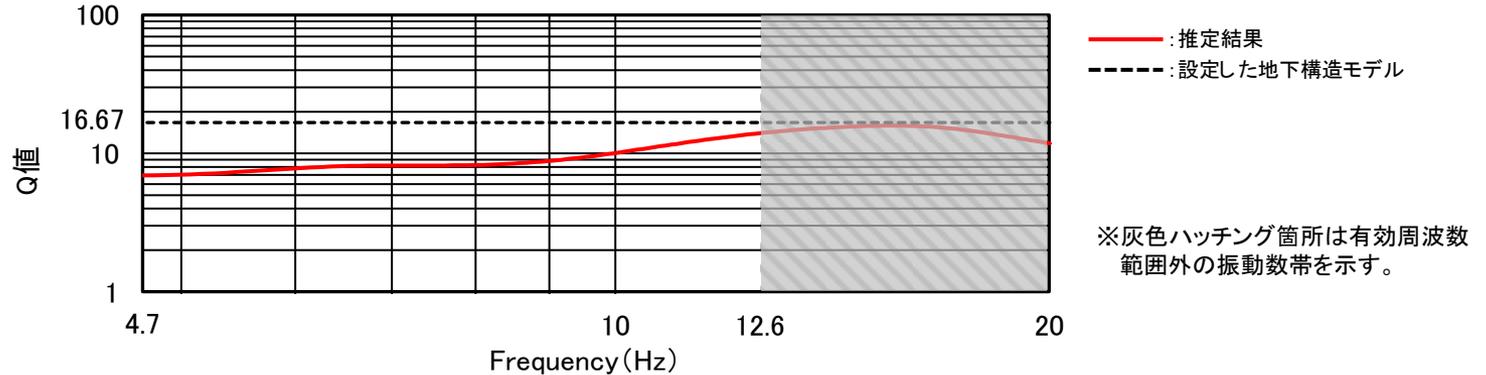
(4) デコンボリューション波形の評価結果(2/2)



全地震のデコンボリューション波形の平均と各地震のデコンボリューション波形の相関(2/2)

(5) 検討結果

○ 推定したQ値は、設定した地下構造モデルのQ値を下回り、検討対象区間(EL+19.5m~EL-200m)と概ね対応する区間におけるR-9孔及びD-8.6孔のQ値測定結果(7.6~10.4)とも調和的である。なお、高振動数側でQ値がほぼ一定となる傾向は、Fukushima et al. (2016)とも調和的である。



推定したQ値と設定した地下構造モデルのQ値の比較

設定した地下構造モデル

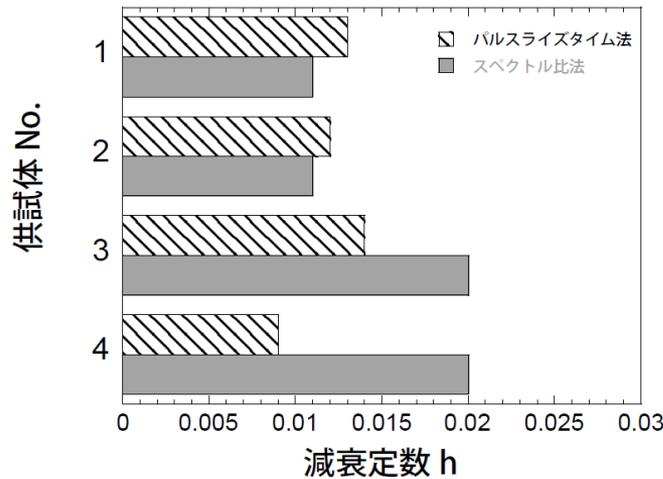
標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□: 妥当性を確認した範囲

➤ 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-10m~EL-200mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

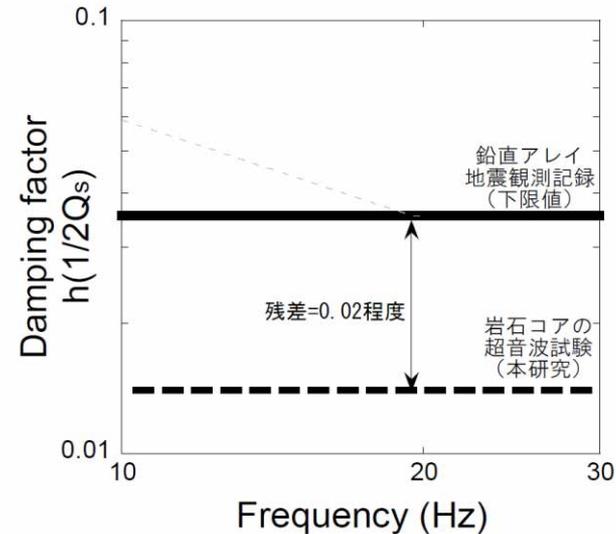
(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-990mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤・岡田(2012)に倣い、敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 佐藤・岡田(2012)は、超音波試験による岩石コアの減衰測定の適用性を検討するとともに、測定された減衰と鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰の差異について考察している。超音波試験による岩石コアの減衰測定の実用性の検討については、代表的な測定方法であるパルスライズタイム法とスペクトル比法の2つの方法について行い、ほぼ同様の評価結果が得られることを示している。また、測定された減衰と鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰の比較を行い、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰定数は、岩石コアから測定された減衰定数に対し、0.02程度大きく、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰に含まれる付加効果の存在を示している。



パルスライズタイム法とスペクトル比法による
岩石コアの減衰定数の比較

※ 佐藤・岡田(2012)より抜粋



鉛直アレー地震観測記録に基づく岩盤層の減衰定数の下限値と
岩石コアの超音波試験に基づく減衰定数(平均値)の比較

※ 佐藤・岡田(2012)より抜粋

(2) 減衰の推定方法

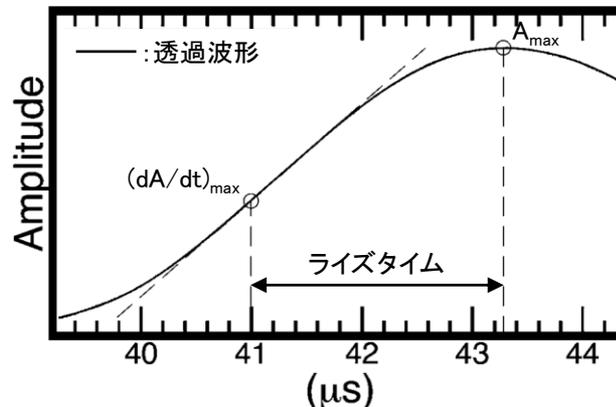
○ 本検討における減衰の推定方法は、佐藤・岡田(2012)において適用性が確認されているパルスライズタイム法を用いた。減衰の推定方法の概要を以下に示す。

- パルスライズタイム法は、減衰性媒質を透過する波動のパルス幅が透過時間及び媒質のQ値により拡大する現象に基づき、複雑な後続の波を使用しないで、透過波の初動パルスの時間幅(ライズタイム)のみを利用して減衰を推定する方法である。
- Gladwin and Stacey(1974)は、均質な岩盤とみなせるようなトンネル等での屋外実験から、透過波初動パルスのライズタイム τ とQ値について、以下のような実験式を得ている。

$$\tau = \tau_0 + c \frac{T}{Q}$$

τ_0 : 入射波初動パルスのライズタイム
 T : 伝播時間
 c : 比例係数

- 佐藤・岡田(2012)によると、パルスライズタイム法の適用において、比例係数Cは、実験の測定条件に応じて決定する必要があるとされていることから、今回用いる岩石コアの大きさ及び性状(S波速度及び想定されるQ値)を考慮して、佐藤・岡田(2012)と同様な数値シミュレーションにより決定した(C=0.553)。また、上式のうち、透過波初動パルスのライズタイム τ 、入射波初動パルスのライズタイム τ_0 及び伝播時間Tは超音波試験により求め、Q値を推定した。
- なお、透過波初動パルスのライズタイム τ の評価においては、Hatherly(1986)に基づき、初動パルスの最大値の時間と最大の傾きを示す時間の差をライズタイムと定義した。また入射波初動パルスのライズタイム τ_0 は、Q値が150,000のアルミニウムを用いた超音波試験により得られた透過波初動パルスのライズタイムとした。

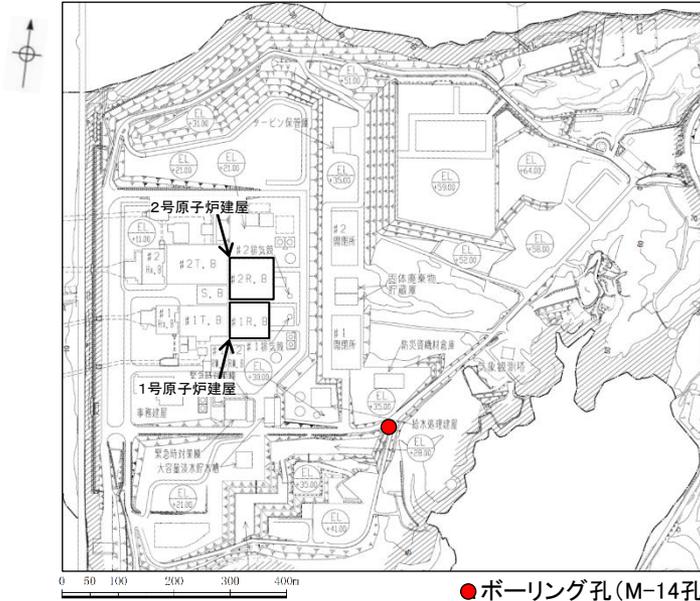


ライズタイムの評価例

3.2.2 岩石コアを用いた減衰の検討

(3) 検討に用いた岩石コア

○ ボーリング孔(M-14孔)において採取した以下の区間の岩石コアを用いた。



● ボーリング孔(M-14孔)

ボーリング孔(M-14孔)の配置図

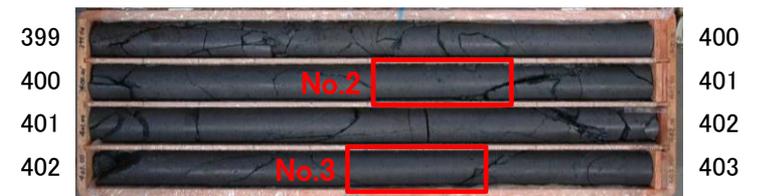
検討に用いた岩石コアの岩種及び区間

コア No.	岩種	区間	
		深度(m)	標高EL(m)
1	安山岩(均質)	284.20 ~ 284.55	-250.12 ~ -250.47
2	安山岩(均質)	400.50 ~ 400.75	-366.42 ~ -366.67
3	安山岩(均質)	402.45 ~ 402.70	-368.37 ~ -368.62
4	安山岩(角礫質)	435.73 ~ 436.00	-401.65 ~ -401.92

深度283.00m~287.00m



深度399.00m~403.00m



深度435.00m~439.00m



岩石コアの写真(M-14孔)

(4) 検討結果

- 推定したQ値(平均値)は30程度であり、設定した地下構造モデルのQ値を下回る。
- なお、佐藤・岡田(2012)による減衰の付加効果を踏まえると、今回検討した範囲における実際の地盤のQ値は、推定したQ値よりもさらに小さいものと考えられる※1。

※1 本検討により推定した減衰定数(1.8%)に、仮に佐藤・岡田(2012)に示される減衰の付加効果(2%)(P.218)を踏まえると、実地盤の減衰定数は3.8%となる。設定した地下構造モデルの減衰定数(1.5%)は、本検討により推定した減衰定数(1.8%)より小さいが、減衰の付加効果を踏まえると、実地盤の減衰定数に対してさらに小さいものと考えられる。

減衰の推定結果

コア No.	岩種	区間 標高EL(m)	入射波初動パルス のライズタイム $\tau_0(\mu s)$	透過波初動パルス のライズタイム $\tau(\mu s)$	伝播時間 T(μs)	Q値	減衰定数※2 h(%)
1	安山岩(均質)	-250.12 ~ -250.47	1.774	2.257	37.30	42.7	1.2
2	安山岩(均質)	-366.42 ~ -366.67		2.531	37.82	27.6	1.8
3	安山岩(均質)	-368.37 ~ -368.62		2.595	36.24	24.4	2.0
4	安山岩(角礫質)	-401.65 ~ -401.92		2.715	41.86	24.5	2.0
平均						29.8	1.8

※2 減衰定数hは、 $h=1/2Q$ の関係式より算出した。

設定した地下構造モデル

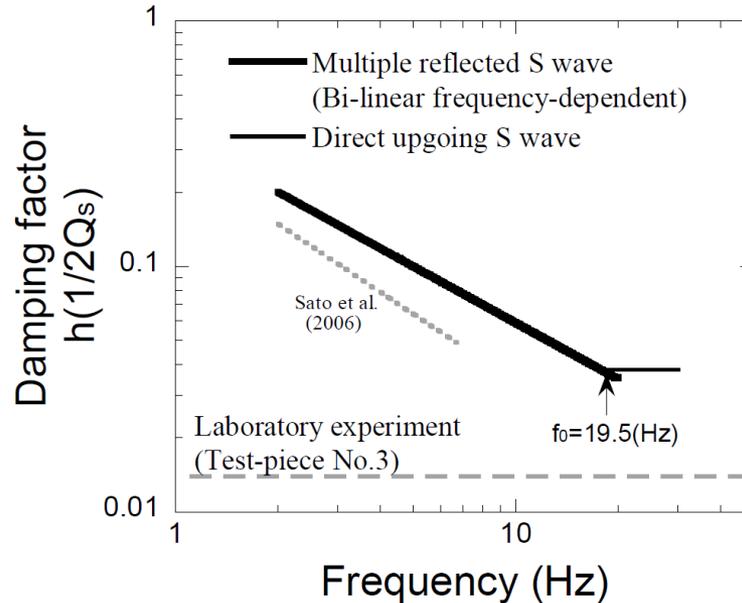
標高EL	層厚 (m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

-200m ~ -990m: 妥当性を確認した範囲

- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m~EL-990mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

(1) 検討方法

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤(2012)に倣い、敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 佐藤(2012)は、地表に近い岩盤の減衰について、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰と岩石コアの超音波試験により測定された減衰を比較し、岩石コアの超音波試験により測定された減衰が相対的に小さくなる要因として、顕著な亀裂や不均質が存在しなかったことが考えられるとし、鉛直アレー地震観測記録により評価された減衰は亀裂や不均質によって付加的な減衰効果が発生していると推察している。また、鉛直アレー地震観測記録を用いた減衰の評価については、S波重複反射波のスペクトル比及びS波直達上昇波のスペクトル比のそれぞれを用いた方法について行われ、高周波数側で両者が対応することを示している。



佐藤(2012)に示される測定された減衰の比較

※ 佐藤(2012)より抜粋

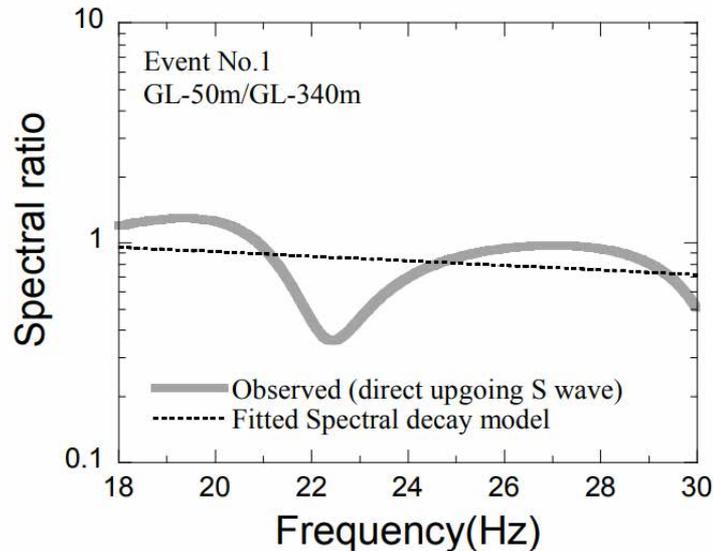
(2) 減衰の推定方法

○ 減衰の推定方法の概要を以下に示す。

- 佐藤(2012)によると, S波直達上昇波を用いた減衰の推定方法は, 地震観測点間を上昇するS波直達波のスペクトル比を用いる方法で, 反射波等の影響を受けにくい岩盤における地震観測記録を用いる場合に有効な方法であるとされている。
- 減衰の推定は, 佐藤(2012)に倣い, 鉛直アレー地震観測点における2つの観測点間のS波直達上昇波のスペクトル比 A/A_0 (A は上部地震計のフーリエスペクトル, A_0 は下部地震計のフーリエスペクトル)を算定し, 下式のスペクトル低減モデルをフィッティングすることにより行った。

$$\ln\left(\frac{A(f)}{A_0(f)}\right) = -\frac{\pi t}{Q} f + c$$

Q : Q値
 f : 周波数
 t : 地震観測点間の伝播時間
 c : 定数

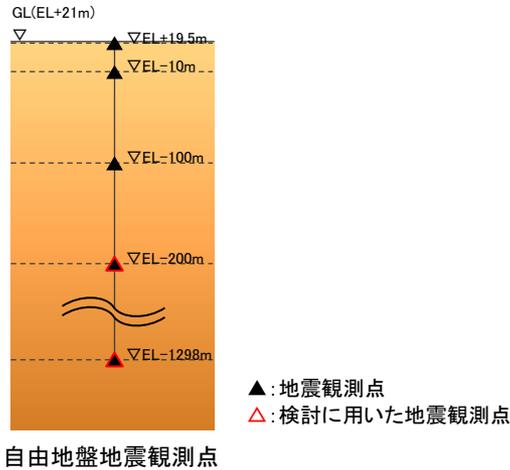


佐藤(2012)に示される観測記録に基づくS波直達上昇波のスペクトル比と
スペクトル低減モデルによりフィッティングした結果の比較

※ 佐藤(2012)より抜粋

(3) 検討の対象とした地震

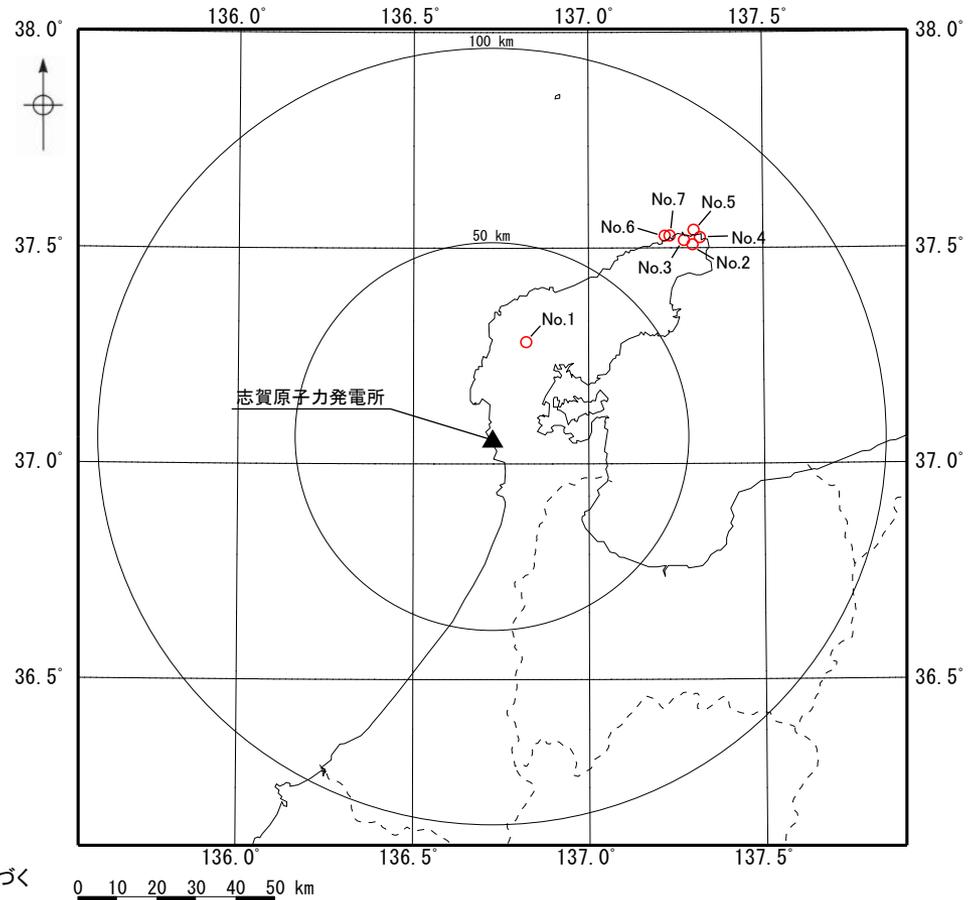
- 検討対象区間は、反射波の影響が小さい自由地盤地震観測点におけるEL-200m～EL-1298mとした。
- 検討の対象とした地震の諸元及び震央分布図を下記に示す。検討の対象は、2019年7月～2023年5月に自由地盤地震観測点におけるEL-1298mとEL-200mで同時に観測された地震のうち、敷地から100km以内において発生したM5以上の7地震とした。



検討の対象とした地震の諸元*

No.	震源情報						震央距離 (km)
	日付	時刻	北緯 (°)	東経 (°)	深さ (km)	M	
1	2020/03/13	02:18	37.2797	136.8245	12.33	5.5	25.8
2	2021/09/16	18:42	37.5053	137.3008	13.12	5.1	70.9
3	2022/06/19	15:08	37.5153	137.2763	13.14	5.4	70.1
4	2022/06/20	10:31	37.5220	137.3220	13.86	5.0	73.5
5	2023/05/05	14:42	37.5390	137.3045	12.14	6.5	73.8
6	2023/05/05	14:53	37.5257	137.2218	12.81	5.0	67.7
7	2023/05/05	21:58	37.5263	137.2355	13.70	5.9	68.6

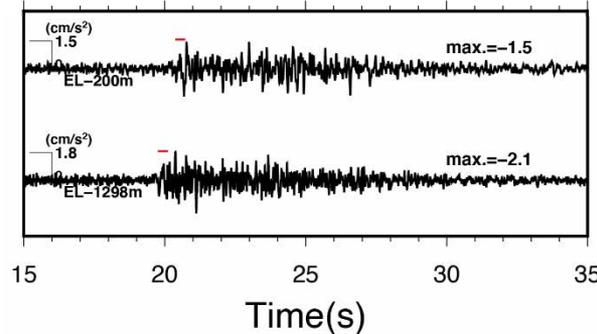
* 気象庁「地震月報(カタログ編)」または防災科学技術研究所「Hi-net検測値データ」に基づく



検討の対象とした地震の震央分布図

(4) 検討結果

- 推定したQ値は26.81であり、設定した地下構造モデルのQ値を下回る。
- 推定したQ値26.81は、検討対象区間(EL-200m~EL-1298m)と概ね対応するD-8.6孔のEL-160m~EL-990mの区間のQ値測定結果27.4とも調和的である。

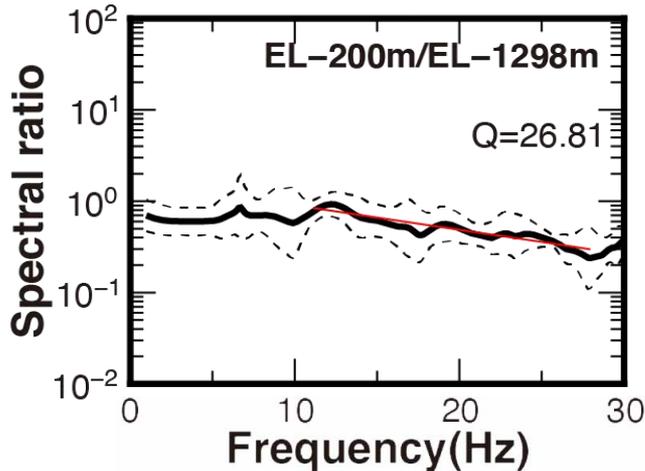


検討に用いた波形例

(赤線区間はS波直達上昇波として解析に用いた区間※)

※ S波直達上昇波として解析に用いる区間は、自由地盤地震観測点のEL+19.5mの地震観測記録で各深度の地震観測記録をデコンボリューションした波形により、入射波と反射波を分離したフェーズから確認した反射波の到達時間を踏まえて設定

- : S波直達上昇波スペクトル比(平均値)
- - - : S波直達上昇波スペクトル比(±σ)
- (red) : フィッティング結果



設定した地下構造モデル

標高EL	層厚(m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m³)	減衰定数 h (%)	Q値
-10m						
-108.9m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
-200m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
-990m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
-1.19km	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
-1.79km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
-3km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
-5.5km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
-18km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
-28km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

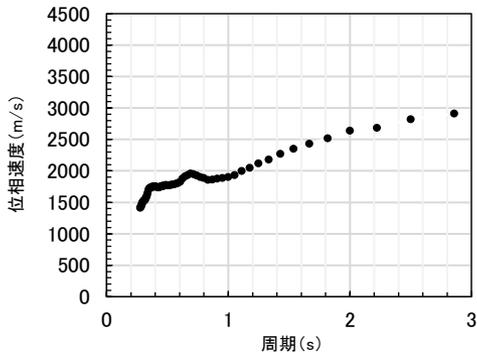
□: 妥当性を確認した範囲

- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m~EL-1.19kmの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

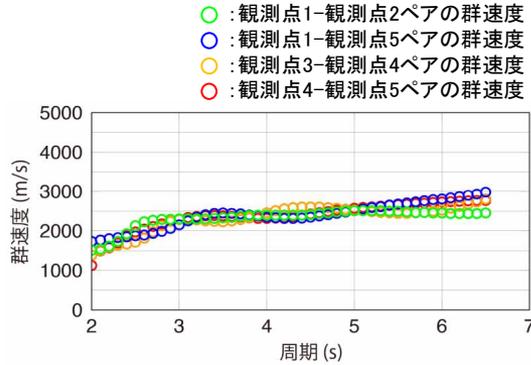
3.3 速度構造の妥当性確認

(1)速度構造の妥当性確認の方針

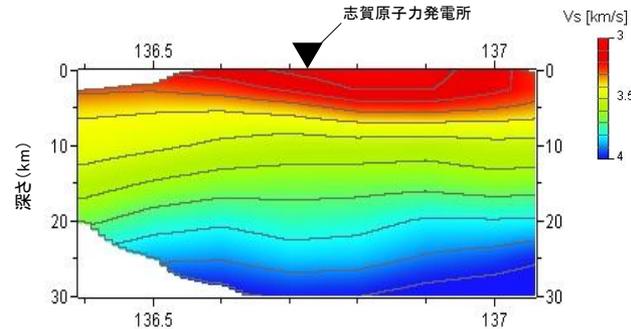
- 設定した地下構造モデルのEL-3kmより浅部の速度構造は敷地における地盤調査（浅層ボーリング調査，大深度ボーリング調査及び微動アレー探査）の結果に基づき設定し，またEL-3km以深の速度構造は文献に基づき設定している。ここでは，地下構造モデルの速度構造が適切に設定されていることを確認するため，以下を実施する。
 - ・ 敷地における微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルに基づく位相速度を比較する。（3.3節(2)）
 - ・ 敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルに基づく群速度を比較する。（3.3節(3)）
 - ・ 申請時以降に得られた知見において評価された敷地における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較する。（3.3節(4)）



敷地における微動アレー探査により得られた位相速度



敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度



申請後に得られた知見において評価された速度構造

設定した地下構造モデルに基づく理論位相速度と比較(3.3節(2))

設定した地下構造モデルに基づく理論群速度と比較(3.3節(3))

設定した地下構造モデルの速度構造と比較(3.3節(4))

設定した地下構造モデル

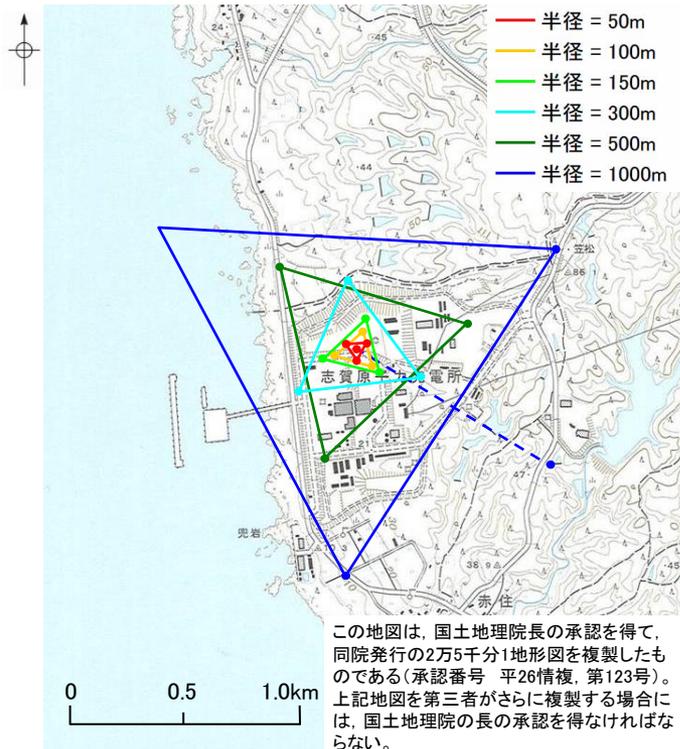
解放基盤表面 ▽	標高EL	層厚(m)	S波速度 Vs (km/s)	P波速度 Vp (km/s)	密度 ρ (t/m ³)	減衰定数 h (%)	Q値
	-10m	98.9	1.50	3.19	2.37	3.000	16.67
	-108.9m	91.1	1.96	3.96	2.38	3.000	16.67
地震基盤 ▽	-200m	790	2.14	3.92	2.34	1.500	33.33
	-990m	200	1.56	3.26	2.41	1.000	50
	-1.19km	600	3.16	5.29	2.67	0.250	200
	-1.79km	1,210	3.3	5.4	2.7	0.250	200
	-3km	2,500	3.5	5.6	2.7	0.250	200
	-5.5km	12,500	3.6	6.3	2.7	0.185	270
	-18km	10,000	3.9	6.8	2.8	0.125	400
	-28km	∞	4.4	7.6	3.1	0.100	500

□ : 3.3節で確認する範囲

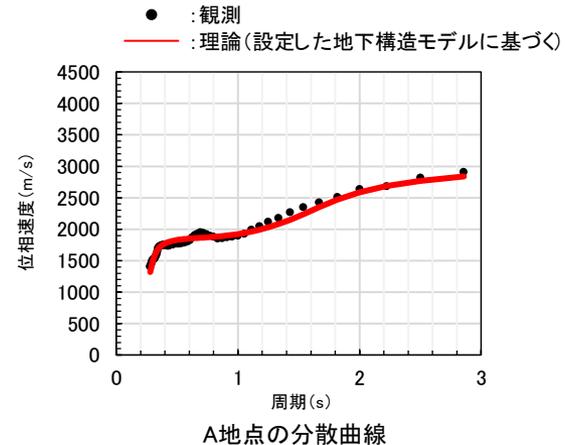
3.3 速度構造の妥当性確認

(2) 位相速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-1.19kmからEL-3kmの速度構造は敷地の微動アレー探査結果に基づき設定している(詳細はP.188～189参照)。ここでは設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルの理論位相速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論位相速度は、全周期帯において、微動アレー探査により得られた位相速度と調和的である。



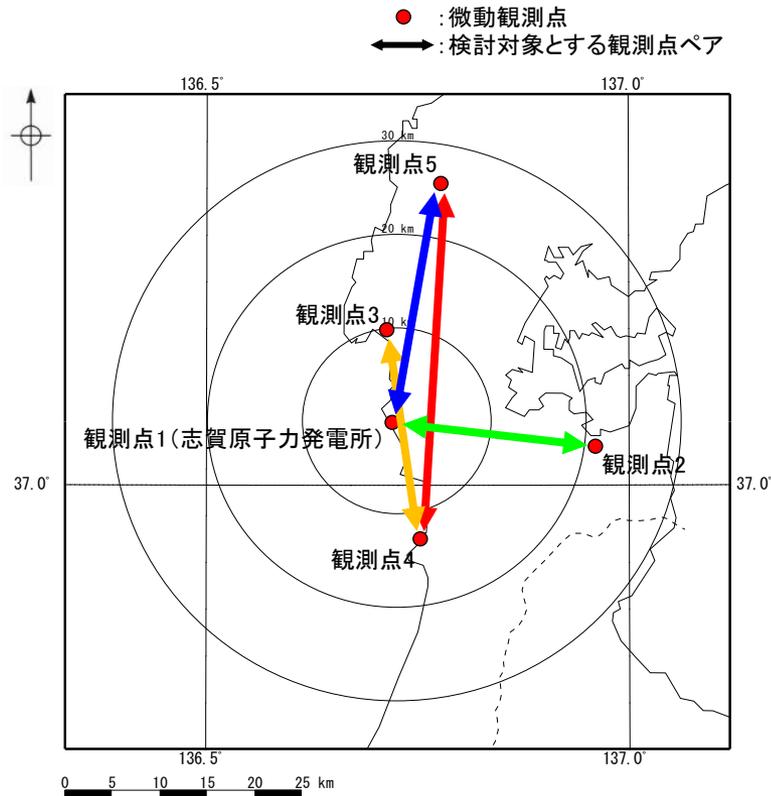
微動アレー探査地点(A地点)



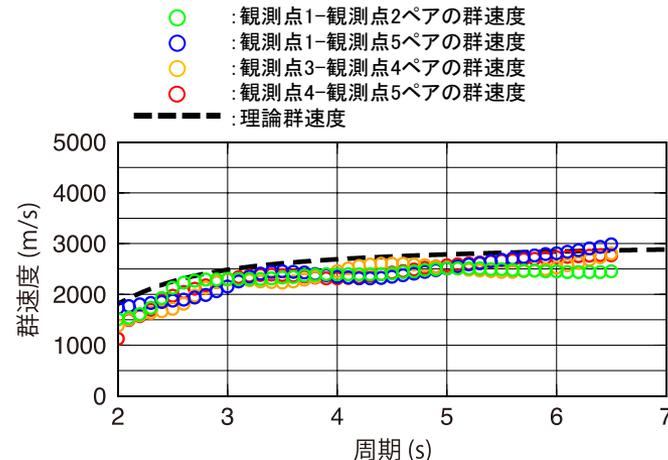
➤ 微動アレー探査により得られた位相速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(3) 群速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は敷地の微動アレー探査結果及び文献に基づき設定している(詳細はP.185~189参照)。ここでは設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルの理論群速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論群速度は、地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられる周期2秒程度より長周期側※において、微動観測記録により得られた群速度と調和的である。



微動観測点配置図



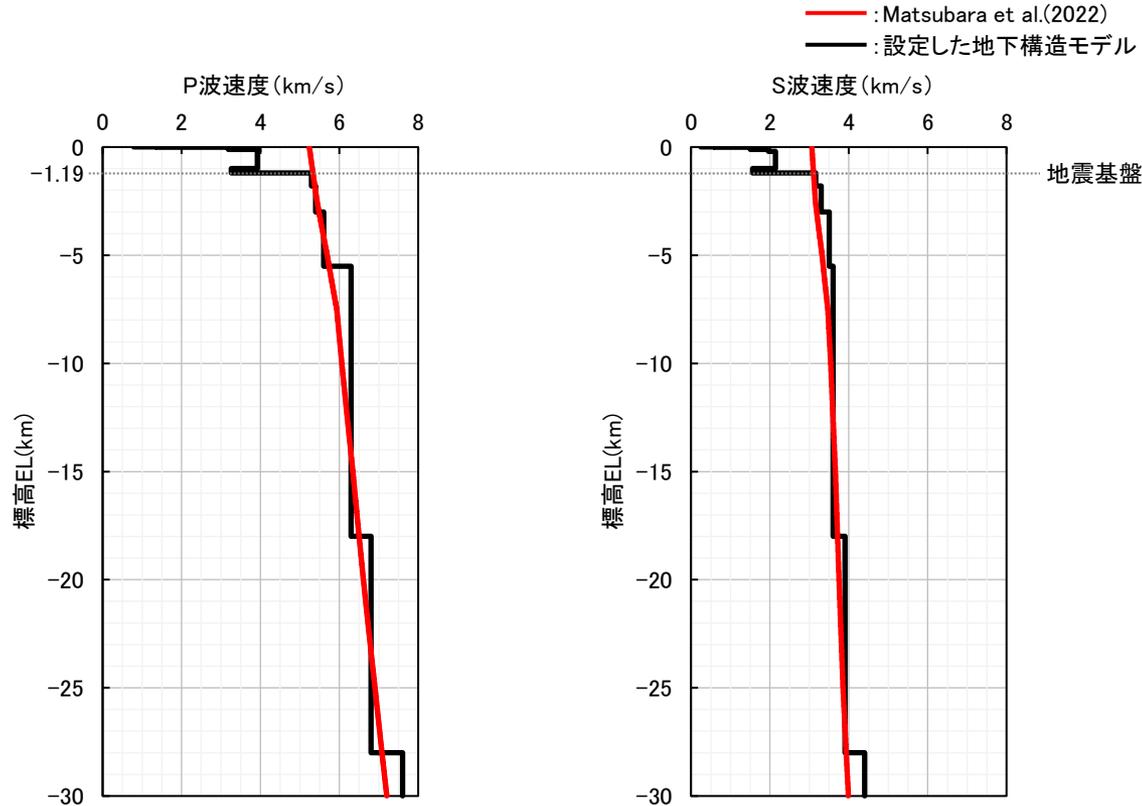
微動観測記録により得られた群速度と
設定した地下構造モデルの理論群速度の比較

※ 群速度における周期2秒程度より長周期側が、敷地周辺の地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられることについては、P.127参照。

- 微動観測記録により得られた群速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(4) 知見を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、申請時以降に得られた知見 (Matsubara et al.(2022)(P.112~113))において評価された敷地における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較した。
- Matsubara et al.(2022)により評価された敷地における地震基盤より深部の速度構造は、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造と調和的である。



P波速度構造
S波速度構造
Matsubara et al.(2022)により評価された敷地における速度構造と
設定した地下構造モデルの比較

※Matsubara et al.(2022)の初期速度構造モデルは、防災科学技術研究所のHi-netルーチン処理で使用されている1次元速度構造が採用されている。

- Matsubara et al.(2022)により評価された敷地における地震基盤より深部の速度構造と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

まとめ(1/2)

- 地下構造モデル全体として妥当性を確認するため、下記について確認を行った。
 - ・ 設定した地下構造モデルの地震基盤から解放基盤表面までの地盤増幅特性を対象として、鉛直アレー地震観測記録を用いた地震動シミュレーション等による地盤増幅特性と比較し、安全側に設定されていること
 - ・ 設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の減衰構造を対象として、設定根拠としているボーリング調査結果(Q値測定結果)以外の検討結果(鉛直アレー地震観測記録や岩石コアを用いた検討結果)と比較し、安全側に設定されていること
 - ・ 設定した地下構造モデルの速度構造を対象として、敷地及び敷地周辺で実施した物理探査結果や申請時以降に得られた知見と比較し、適切に設定されていること

3.1 地盤増幅特性の妥当性確認

3.1.1 地震動シミュレーションによる地盤増幅特性の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤～解放基盤表面の地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いて、設定した地下構造モデルによる地震動シミュレーションを行い、シミュレーション解析結果と観測記録を比較した。
- シミュレーション解析結果は観測記録に対して同程度あるいは大きいことから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.1.2 逆解析による地盤増幅特性の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤～解放基盤表面の地盤増幅特性が安全側に設定されていることを確認するため、敷地の鉛直アレー地震観測記録を用いた逆解析により推定した地下構造モデルと設定した地下構造モデルの地盤増幅率を比較した。
- 設定した地下構造モデルの地盤増幅率は、逆解析により推定した地下構造モデルの地盤増幅率を上回ることから、設定した地下構造モデルは安全側に設定されていると考えられる。

3.2 減衰構造の妥当性確認

3.2.1 地震波干渉法を用いた減衰の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-10m～EL-200mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、Fukushima et al.(2016)に倣い、地震波干渉法を敷地の鉛直アレー地震観測記録に適用することにより減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-10m～EL-200mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

3.2.2 岩石コアを用いた減衰の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-990mの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤・岡田(2012)に倣い、敷地で実施したボーリング調査により得られた岩石コアを用いて超音波試験により減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-990mの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

まとめ(2/2)

3.2.3 S波直達上昇波を用いた減衰の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造が安全側に設定されていることを確認するため、佐藤(2012)に倣い、敷地の鉛直アレー地震観測記録のS波直達上昇波を用いて減衰を推定し、設定した地下構造モデルの減衰と比較した。
- 推定したQ値が設定した地下構造モデルのQ値を下回ることから、設定した地下構造モデルのEL-200m～EL-1.19kmの減衰構造は安全側に設定されていると考えられる。

3.3 速度構造の妥当性確認

(2) 位相速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、微動アレー探査により得られた位相速度と設定した地下構造モデルの理論位相速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論位相速度は、全周期帯において、微動アレー探査により得られた位相速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルのEL-1.19km以浅の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(3) 群速度を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、敷地周辺の微動観測記録により得られた群速度と設定した地下構造モデルの理論群速度を比較した。
- 設定した地下構造モデルに基づく理論群速度は、地震基盤より深部の速度構造を反映していると考えられる周期2秒程度より長周期側において、微動観測記録により得られた群速度と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

(4) 知見を用いた速度構造の検討

- 設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造が適切に設定されていることを確認するため、申請時以降に得られた知見(Matsubara et al.(2022))において評価された敷地における速度構造と設定した地下構造モデルの速度構造を比較した。
- Matsubara et al.(2022)により評価された敷地における地震基盤より深部の速度構造と調和的であることから、設定した地下構造モデルの地震基盤より深部の速度構造は適切に設定されていると考えられる。

- 以上により、地震基盤から解放基盤表面までの地盤増幅特性は安全側に設定されていること、EL-1.19km以浅の減衰構造は安全側に設定されていること、及び速度構造は適切に設定されていることを確認したことから、地下構造モデル全体として妥当性を確認した。