

原子力科学研究所(JRR-3)

基準地震動に対する標準応答スペクトルの影響検討 (コメント回答資料)

令和4年1月20日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. 会合におけるコメント	.....	2
2. 検討概要	.....	3
3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価	.....	4
4. 参考文献	.....	22

補足資料

1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比	.....	23
2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)	.....	25

1. 会合におけるコメント

No.	審査会合	コメント	回答状況	ページ
1	<p>令和3年9月3日 第6回標準応答スペクトルの 規制への取り入れに伴う設 置変更許可申請等の要否に 係る会合</p>	<p>地震基盤相当面を$v_s=2,000\text{m/s}$として実施した地震動評価は、規則の解釈の$v_s=2,200\text{m/s}$以上とは異なっており見直すこと。その際、「参考資料で示した再設定した地盤構造モデル(地震基盤相当面$v_s=2,200\text{m/s}$)による評価」とするのか、「既許可の地盤構造モデル(地震基盤相当面$v_s=2,500\text{m/s}$)による評価」とするのか整理検討が必要。なお、「再設定した地盤構造モデルによる評価」とする場合、その位置付けや理由を明確にし、再設定したモデルの妥当性、根拠や記載の充実化、既許可の基準地震動(統計的グリーン関数法による地震動評価)への影響についても考慮する必要がある。</p>	<p>今回 ご説明</p>	<p>4~12</p>
2	<p>”</p>	<p>模擬地震波の作成や地盤の伝播特性について、ばらつきや差異があることが否定できないため、乱數位相の他に実位相を考慮し、複数の模擬地震波を作成して応答スペクトルへの影響を確認すること。例えば、敷地内の観測記録の活用等考慮の上、検討すること。</p>	<p>”</p>	<p>13~21</p>

2. 検討概要

- 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の一部改正により、震源を特定せず策定する地震動のうち全国共通に考慮すべき地震動の策定に当たっては、「震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面における標準的な応答スペクトル」(以下「標準応答スペクトル」という。)を用いることが新たに規定された。
- 本資料では、標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定し、標準応答スペクトルを考慮した地震動が、平成30年11月7日付けで設置変更許可(以下「既許可」という。)を受けた原子力科学研究所のJRR-3原子炉施設(以下「JRR-3」という。)の基準地震動に包絡されることを確認したことから、本件の改正に係る基準地震動の変更が不要であることを説明する。

- 新たに制定された標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動Ss-Dの比較を行う。

■ 標準応答スペクトルの概要

震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面(地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。)における標準応答スペクトルとして次の図に示すものとする。

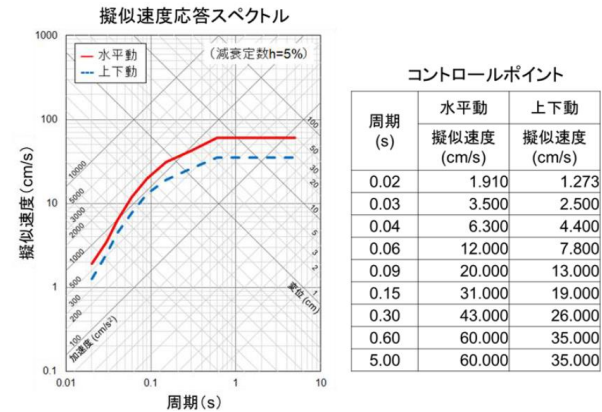
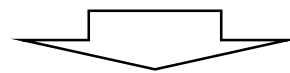


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル
※2021年4月21日原子力規制委員会資料より抜粋

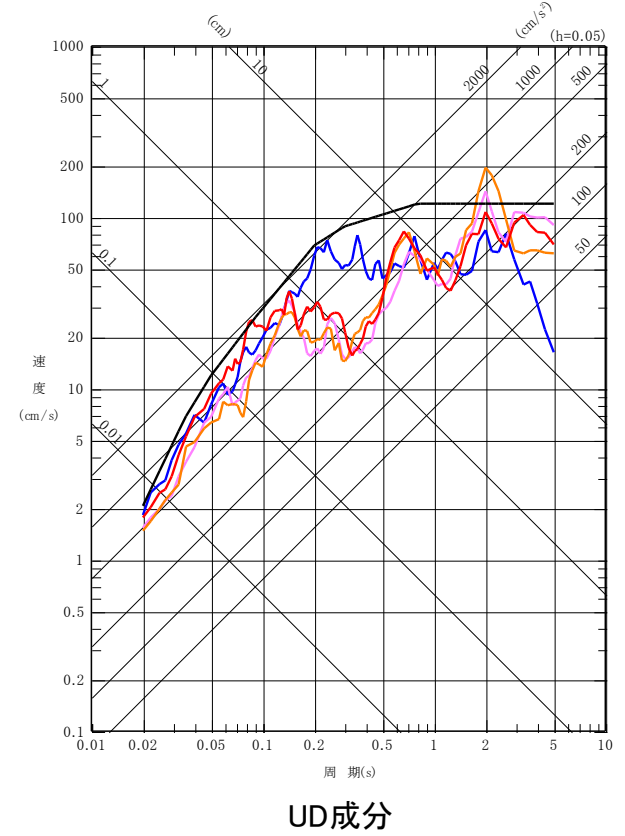
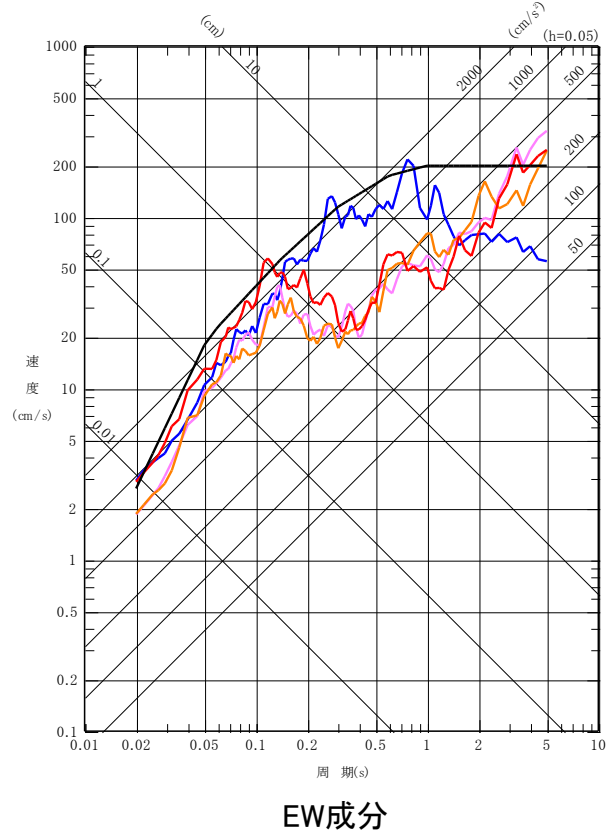
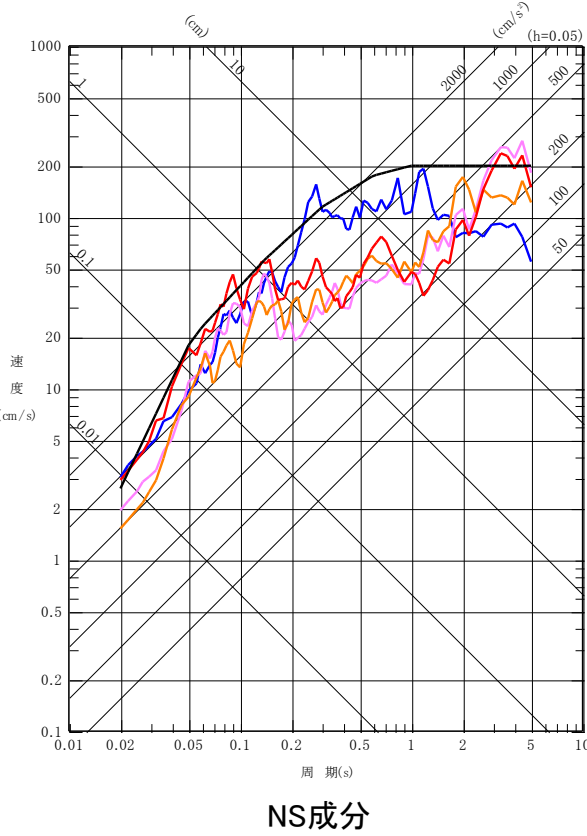


基準地震動Ssを策定している解放基盤表面のせん断波速度Vs	検討方針
710m/s	<ul style="list-style-type: none"> 標準応答スペクトルに対し、地震基盤相当面から解放基盤表面までの伝搬特性を解放基盤表面の応答スペクトルに反映させるとともに、設定された応答スペクトルと基準地震動Ss-Dとを比較し影響を確認する。 地震基盤相当面については、既許可の地盤構造モデルにおいて、$V_s=2,500\text{m/s}$の層上面(G.L.-0.997km)に設定し、解放基盤表面の地震動を評価する。

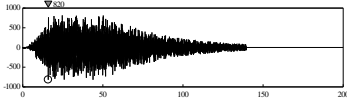
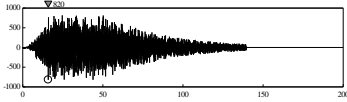
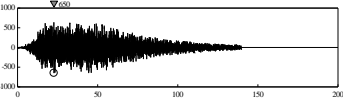
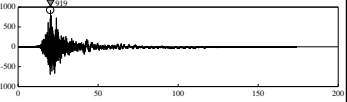
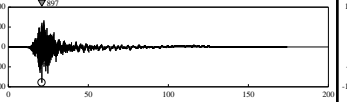
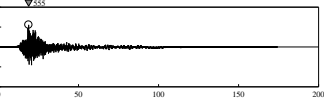
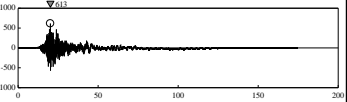
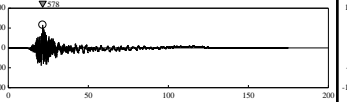
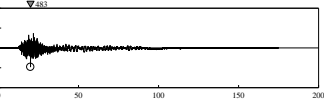
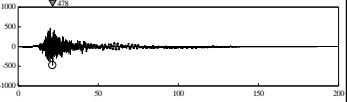
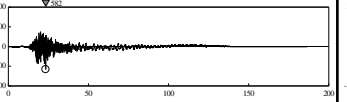
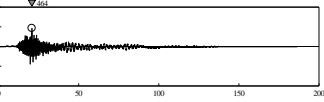
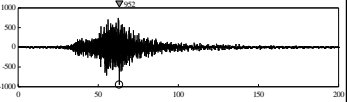
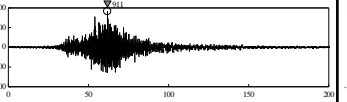
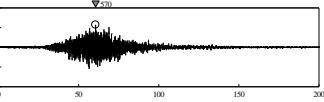
3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 基準地震動S_s: 応答スペクトル

■ 基準地震動S_sの応答スペクトル

- S_s-D 応答スペクトル手法による基準地震動
- S_s-1 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-2 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-3 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-4 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)

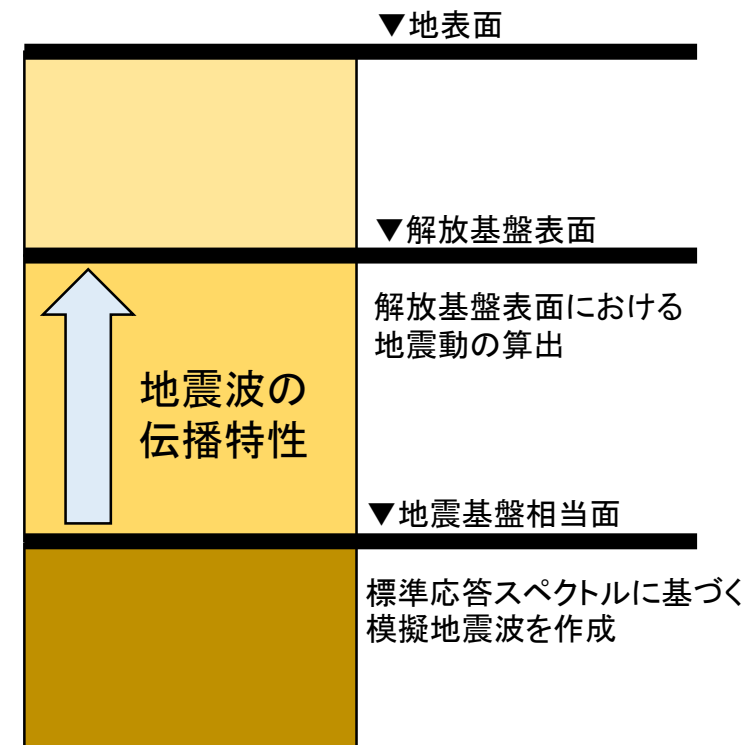
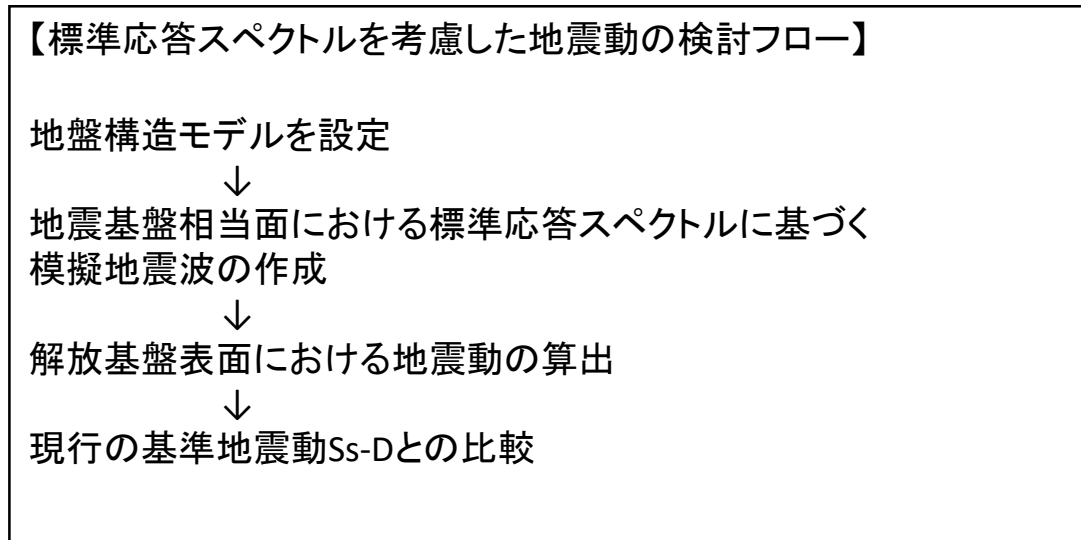


■ 基準地震動S_sの最大加速度の一覧を示す。

基準地震動		最大加速度 (cm/s ²)		
		NS成分	EW成分	UD成分
S _s -D	応答スペクトル手法による基準地震動	820 	820 	650 
S _s -1	F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)	919 	897 	555 
S _s -2	F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)	613 	578 	483 
S _s -3	F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点3)	478 	582 	464 
S _s -4	2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)	952 	911 	570 

※表中のグラフは各基準地震動S_sの加速度時刻歴波形(縦軸: 加速度[cm/s²], 横軸: 時間[s])

- 試験研究の用に供する原子炉等の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の一部改正を踏まえ、敷地において、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を以下の流れで実施する。



標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

- 標準応答スペクトルが、 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の地層で設定された応答スペクトルであることから、既許可の地盤構造モデルのG.L.-0.997km位置($V_s=2,500\text{m/s}$)を地震基盤相当面に設定する。
- 設定した地震基盤相当面に模擬地震波を入力し、地震応答解析により、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を評価する。

地盤構造モデル※

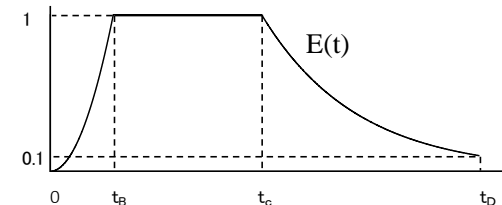
	層番号	上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm^3)	水平成分		鉛直成分			
					S波速度 (km/s)	減衰定数		P波速度 (km/s)	減衰定数	
						Q_s	h_s		Q_p	h_p
▼解放基盤表面	1	0.000	0.360	—	—	—	—	—	—	
	2	-0.360	0.287	1.86	0.710	100	0.005	2.040	100	0.005
	3	-0.647	0.327	2.11	1.200			2.610		
	4	-0.974	0.009	2.24	1.500			3.100		
	5	-0.983	0.014	2.42	2.000			3.950		
▼地震基盤相当面	6	-0.997	0.013	2.57	2.500	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$	4.800	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$
	7	-1.010	3.790	2.66	2.900			5.490		
	8	-4.800	12.640	2.70	3.600			5.960		
	9	-17.440	14.560	2.80	4.170			6.810		
	10	-32.000	∞	3.20	4.320			7.640		

※平成30年11月7日付けで設置変更許可を受けた地盤構造モデル

- 模擬地震波※は、乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって作成するものとし、振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al. (2002)¹⁾の方法に基づき、下記に示す形状とする。

模擬地震波	目標最大加速度 (cm/s ²)	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的変化(s)		
			t _B	t _C	t _D
水平成分	600	28.0	3.3	15.0	28.0
鉛直成分	400	28.0	3.3	15.0	28.0

マグニチュード:M=6.9、等価震源距離:Xeq=10km

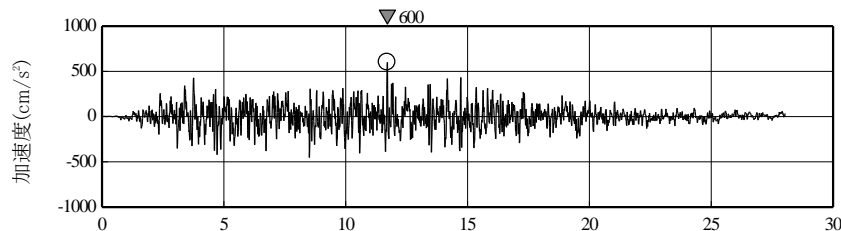


$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

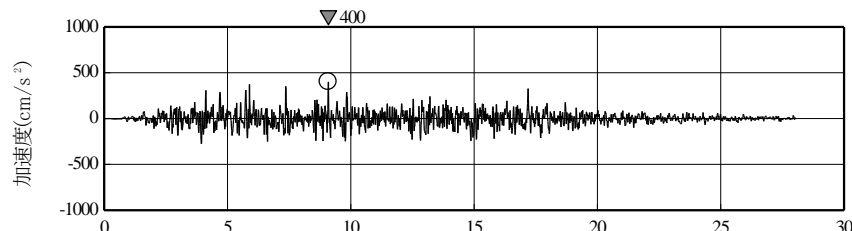
$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \leq t \leq t_B \\ 1 & t_B \leq t \leq t_C \\ \exp[(\ln 0.1)(t - t_C)/(t_D - t_C)] & t_C \leq t \leq t_D \end{cases}$$



水平成分

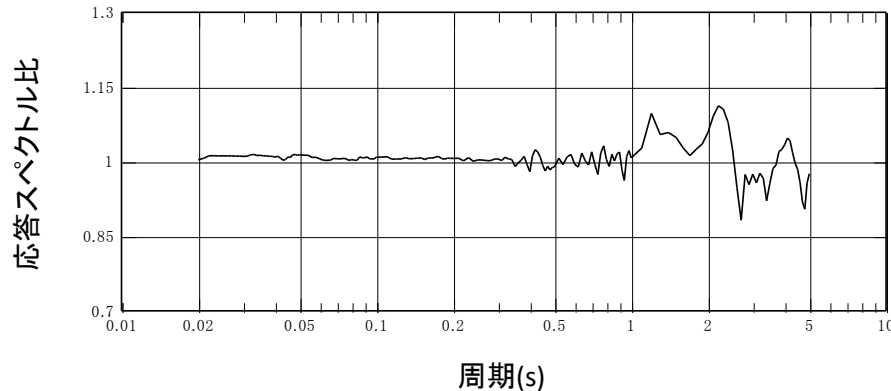


鉛直成分

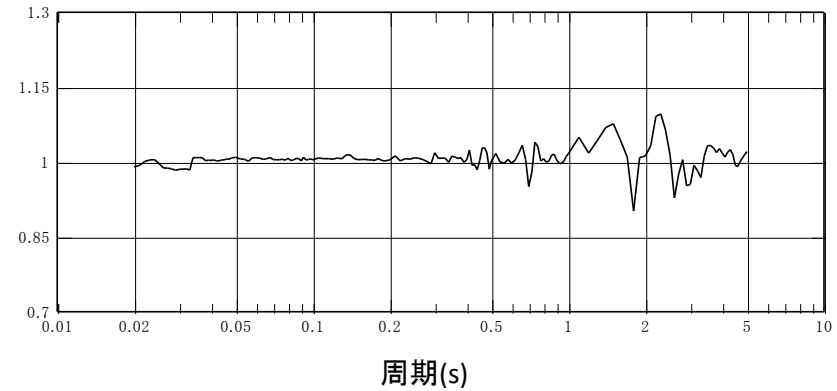
地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波
加速度波形

※模擬地震波を見直し、標準応答スペクトルに対する適合度を向上させている。(補足資料1. 参照)。

- 作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)²⁾に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認する。
- 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比(応答スペクトル比)が全周期帯で0.85以上、応答スペクトル強さの比(SI比)が1.0以上。



応答スペクトル比(水平成分)



応答スペクトル比(鉛直成分)

応答スペクトル強さの比(SI比)

模擬地震波	SI比
水平成分	1.04
鉛直成分	1.03

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

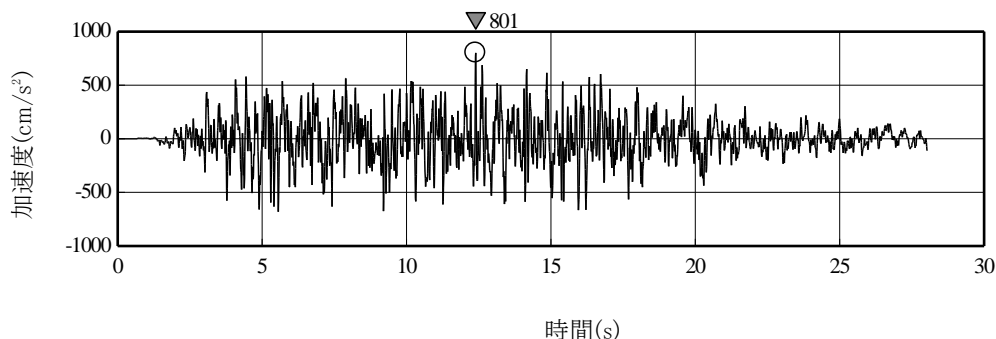
$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T)}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T)} \geq 1.0$$

ただし、
 $R(T)$: 応答スペクトル比
 T : 周期(s)
 $S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値
 $S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

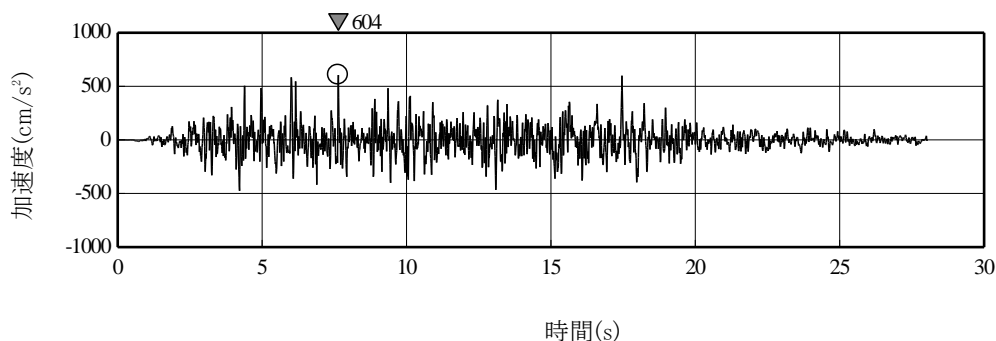
ただし、
 SI : 応答スペクトル強さ
 $S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル
 $\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル
 T : 固有周期(s)

作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)²⁾に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

- 作成した模擬地震波を地震基盤相当面に入力し、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を評価する。
- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動の加速度波形を下記に示す。



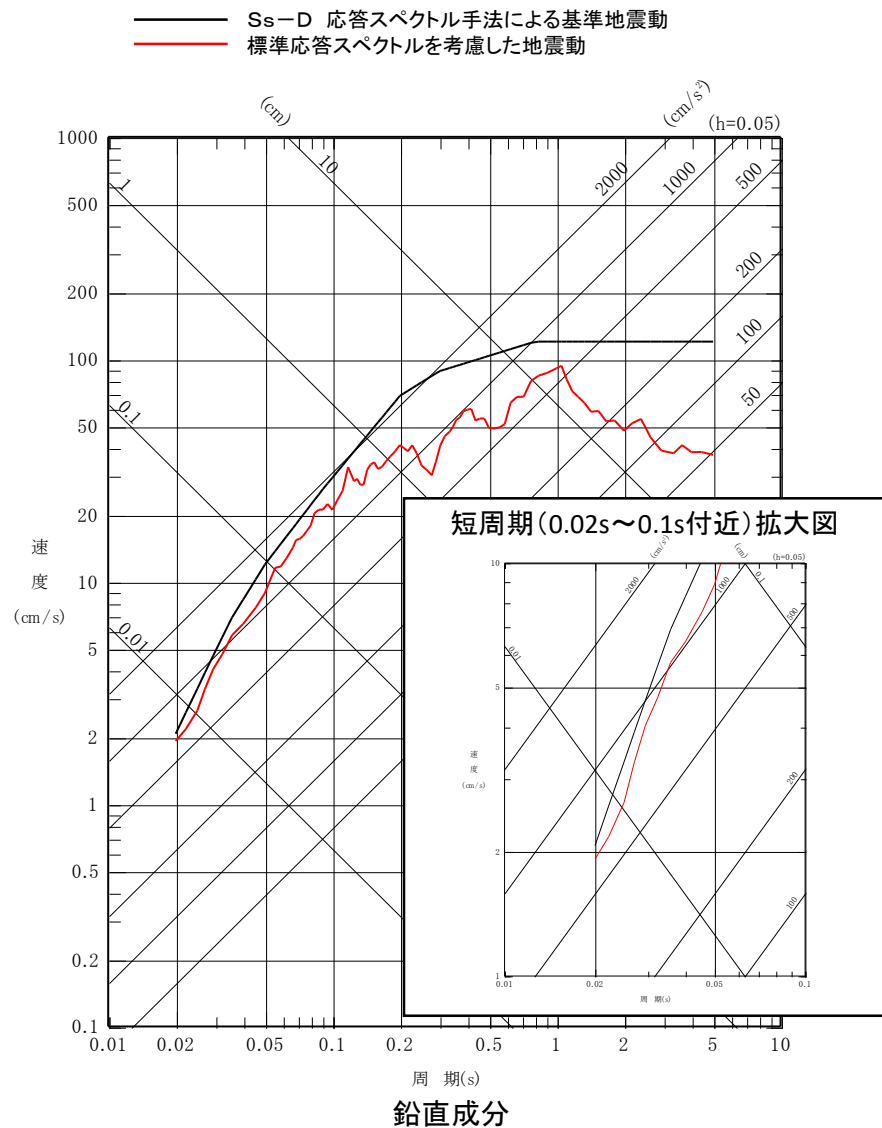
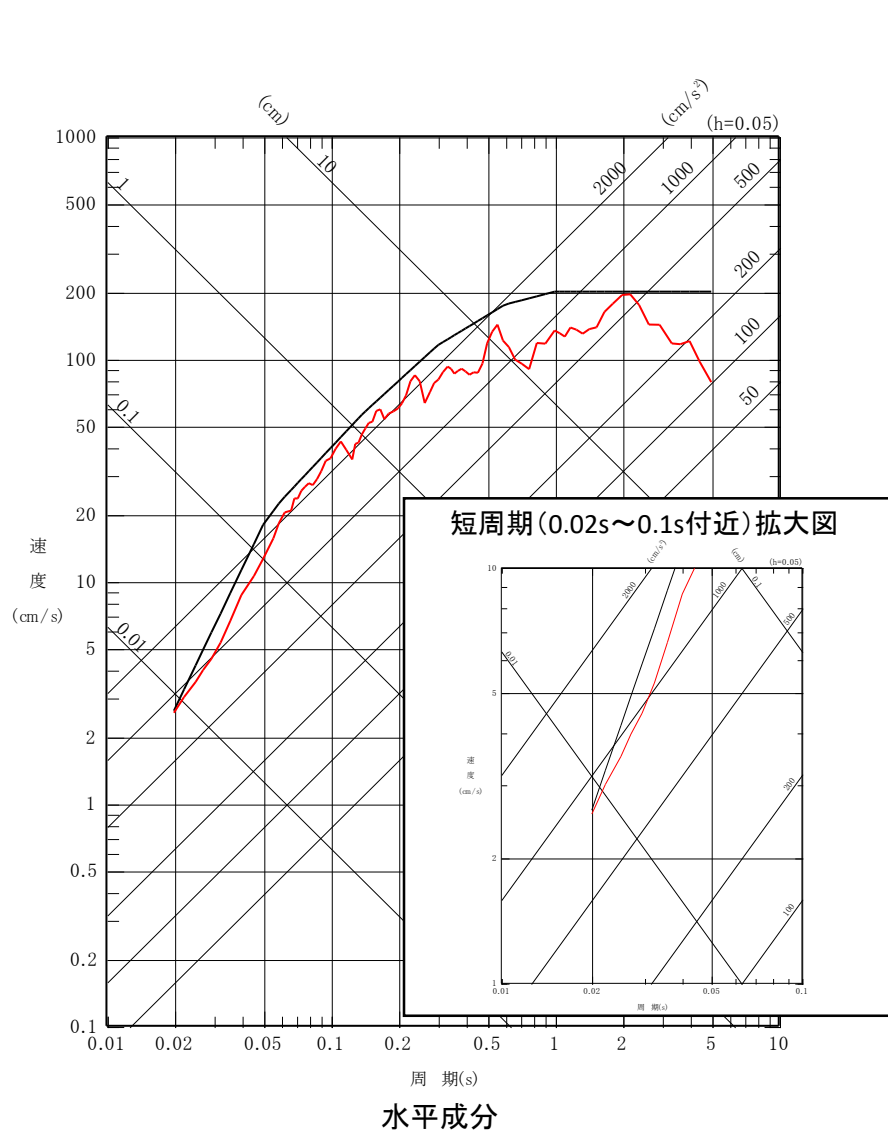
水平成分



鉛直成分

解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動
加速度波形

- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動 S_s-D を比較する。



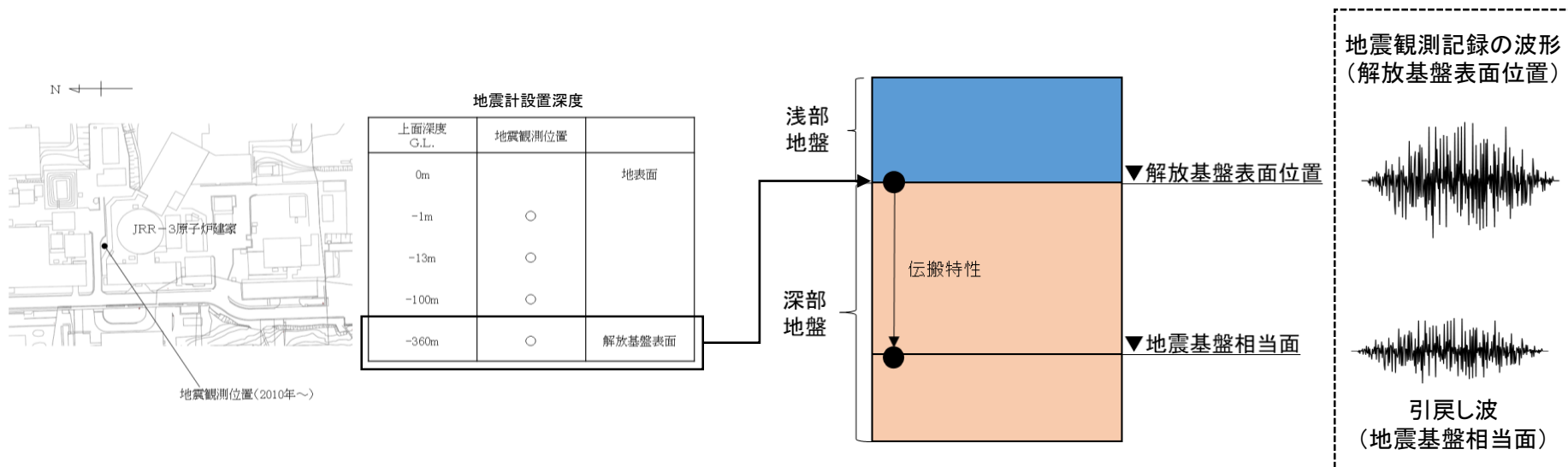
標準応答スペクトルを考慮した地震動は、全周期帯で基準地震動 S_s-D に包絡される。

【検討目的】

- 乱数位相を用いて作成した解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動(以下、「乱数位相による検討」という。)について、妥当性を確認するため、敷地の観測記録を用いた標準応答スペクトルを考慮した地震動を作成し比較を行う。

【検討方法】

- 地震観測記録の位相特性には敷地地盤の振動特性に起因する特徴が反映されており、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」を踏まえ、地震基盤相当面における地震動の位相特性を用いて、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を評価する(以下、「実位相による検討」という。)
- 地震観測記録の位相特性については、浅部+深部地盤構造モデルを用いて、敷地の解放基盤表面位置の地震観測記録を地震基盤相当面に引戻した地震観測記録(地震応答解析結果)の位相特性を用いる。

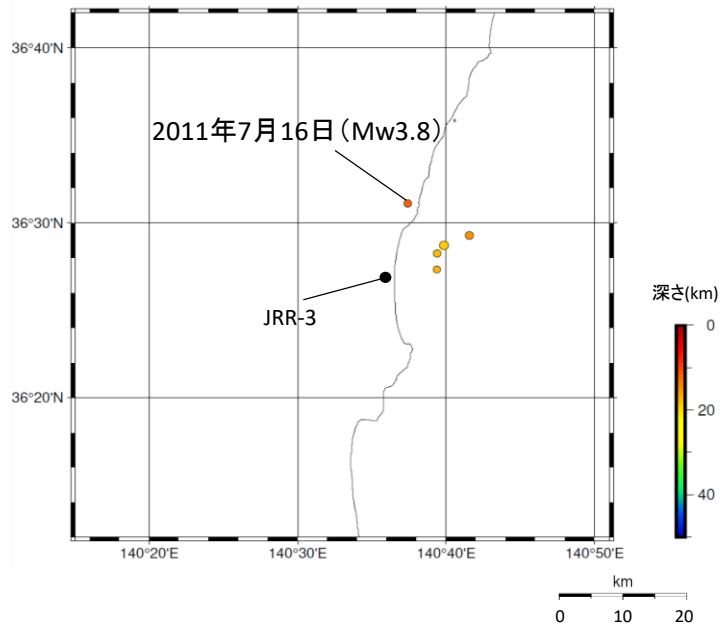


JRR-3 地震観測位置

引戻し解析のイメージ

3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 実位相による検討(地震観測記録)

- 観測記録の位相特性には敷地地盤の振動特性に起因する特徴があるため、「実位相による検討」に用いる検討対象地震は、敷地近傍で観測された地震観測記録から抽出した。
- 「実位相による検討」で用いる地震観測記録は、JRR-3で観測された地震観測記録の中で、震源距離が敷地に一番近い地震観測記録(2011年7月16日(Mw3.8))とする。



震央分布図

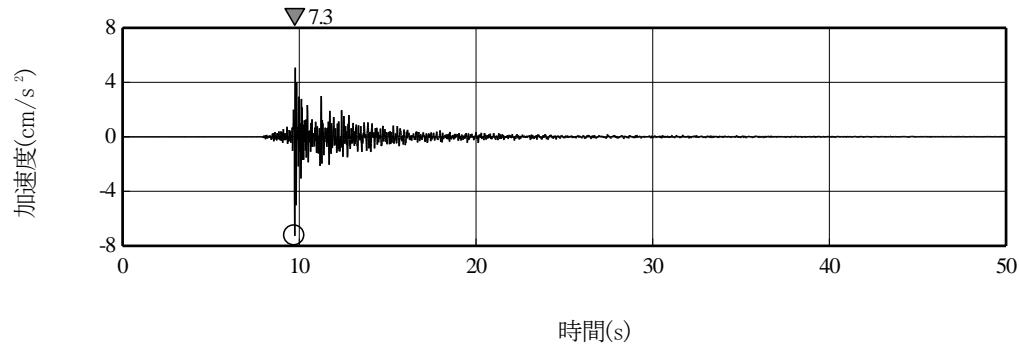
JRR-3で観測された地震観測記録

JRR-3から震央距離約10 kmの範囲にある深さ0~20kmの地震観測記録

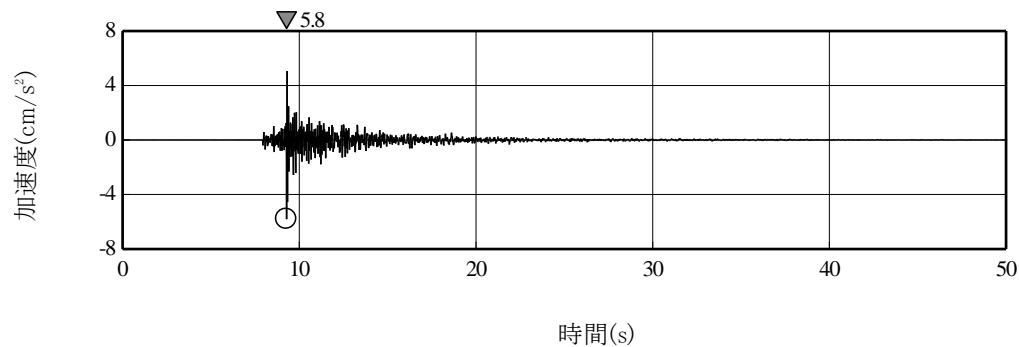
年月日	震央位置		地震規模		深さ (km)	震央距離 (km)	震源距離 (km)	震央地名
	北緯	東経	Mj	Mw [※]				
2011/7/16	36° 31.1'	140° 37.4'	3.5	3.8	12	7.6	14	茨城県北部
2011/11/25	36° 29.2'	140° 41.5'	3.7	4.0	15	9.7	18	茨城県沖
2016/7/21	36° 28.2'	140° 39.3'	3.5	3.8	18	5.8	19	茨城県沖
2019/1/23	36° 27.3'	140° 39.3'	3.3	3.7	18	5.4	19	茨城県沖
2020/9/10	36° 28.7'	140° 39.8'	4.1	4.3	19	6.2	20	茨城県沖

※Mw=0.78Mj+1.08

- 解放基盤表面位置(G.L.-0.360km)における地震観測記録(2011年7月16日(Mw3.8))の加速度波形を以下に示す。



水平成分



鉛直成分

解放基盤表面位置における地震観測記録(2011年7月16日(Mw3.8))
加速度波形

3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 実位相による検討(浅部+深部地盤構造モデル)

- 浅部+深部地盤構造モデルを用いて、解放基盤位置の観測記録を地震基盤相当面(G.L.-0.997km)に引戻し、地震基盤相当面における地震観測記録を算出する。
- 浅部+深部地盤構造モデルを以下に示す。

浅部+深部地盤構造モデル※1

上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)	水平成分		鉛直成分	
			S波速度 (km/s)	減衰定数	P波速度 (km/s)	減衰定数
0.000	0.001	1.97	0.192	0.732×f ^{-1.053}	0.504	0.546×f ^{-0.531}
-0.001	0.005	1.97	0.199		0.470	
-0.006	0.003	1.92	0.333		1.196	
-0.009	0.003	1.77	0.487	0.286×f ^{-1.478}	1.650	0.987×f ^{-1.081}
-0.012	0.001	1.82	0.559		1.603	
-0.013	0.017	1.82	0.483		1.764	
-0.030	0.070	1.73	0.494		1.967	
-0.100	0.110	1.73	0.542	0.061×f ^{-1.506}	1.825	0.408×f ^{-1.788}
-0.210	0.070	1.75	0.619		1.797	
-0.280	0.080	1.78	0.760		2.119	
-0.360	0.287	1.86	0.710	0.005	2.040	0.005
-0.647	0.327	2.11	1.200		2.610	
-0.974	0.009	2.24	1.500		3.100	
-0.983	0.014	2.42	2.000		3.950	
-0.997	0.013	2.57	2.500	0.0045×f ^{-0.69}	4.800	0.0045×f ^{-0.69}
-1.010	3.790	2.66	2.900		5.490	
-4.800	12.640	2.70	3.600		5.960	
-17.440	14.560	2.80	4.170		6.810	
-32.000	∞	3.20	4.320		7.640	

解放基盤表面位置

Vs=710m/s, Vp=2,040m/s

地震基盤相当面

Vs=2,500m/s, Vp=4,800m/s

地震観測記録の波形
(解放基盤表面位置)

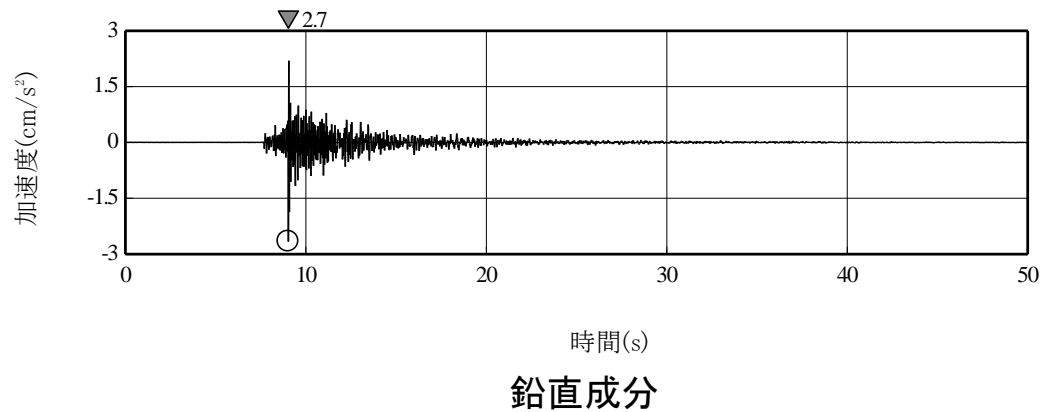
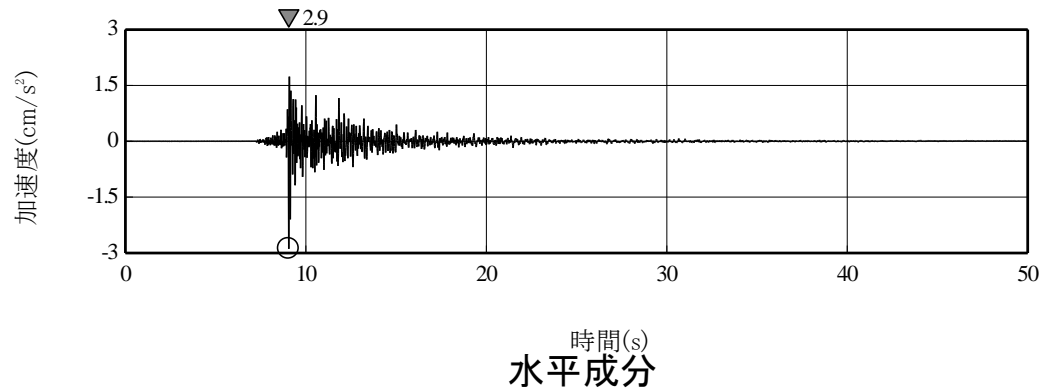


引戻し波
(地震基盤相当面)

※1 浅部+深部地盤構造モデルは、原子力科学研究所 原子炉設置変更許可申請書[JRR-3原子炉施設等の変更]の一部補正の添付書類6(その8) 第5.5-2表 敷地の地盤構造モデル(浅部)～第5.5-3表 敷地の地盤構造モデル(深部)を用いて作成

3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 実位相による検討(地震基盤相当面における地震観測記録)

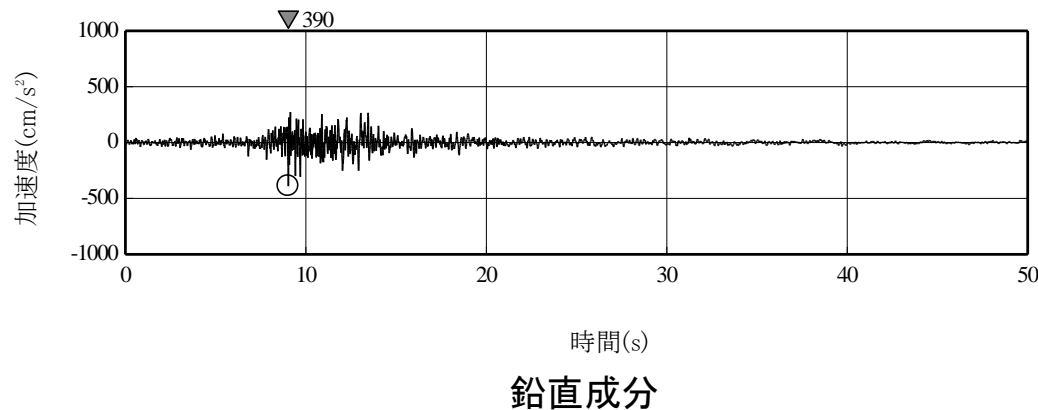
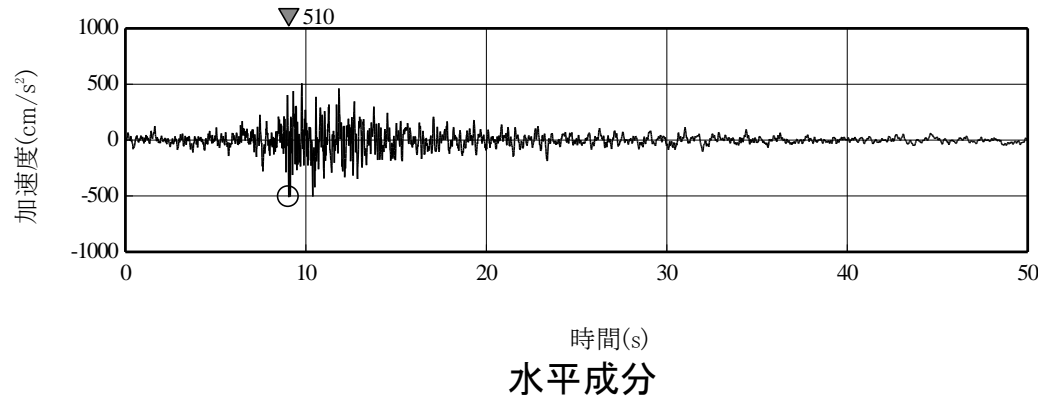
- 地震基盤相当面における地震観測記録(2011年7月16日(Mw3.8))の加速度波形を以下に示す。



地震基盤相当面における地震観測記録(2011年7月16日(Mw3.8))
加速度波形

3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 実位相による検討(模擬地震波の作成結果)

- 模擬地震波は、地震基盤相当面における地震観測記録(2011年7月16日(Mw3.8))の位相特性を用いて作成した。
- 模擬地震波の加速度波形を以下に示す。

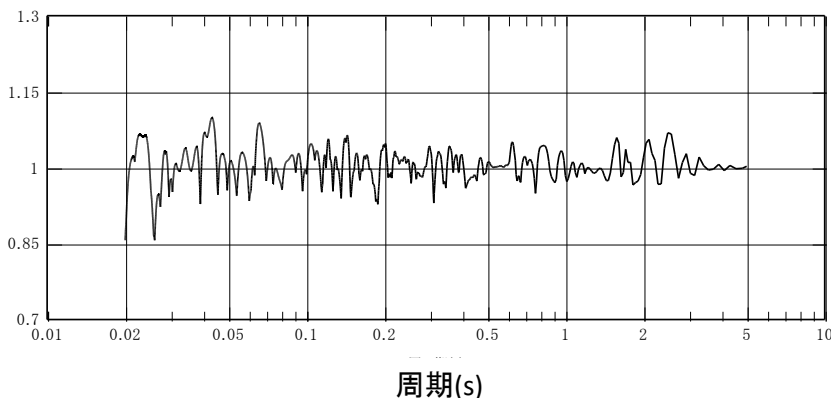


地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(実位相による検討)
加速度波形

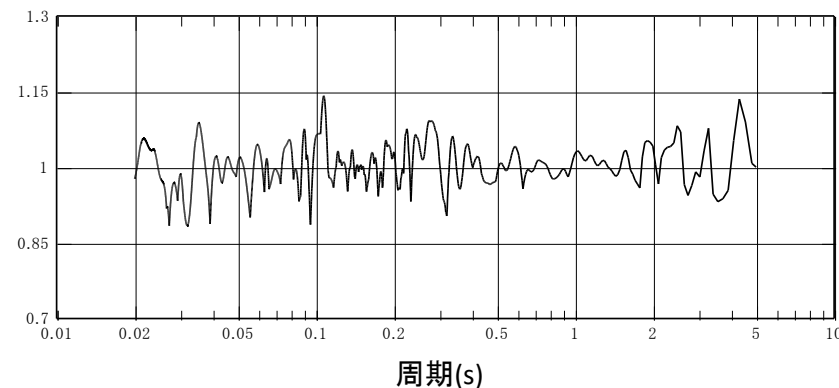
3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 実位相による検討(模擬地震波の作成結果)

- 作成した模擬地震波が、日本電気協会(2015)²⁾に示される以下の適合度の条件を満足していることを確認する。
- 目標とする応答スペクトル値に対する模擬地震波の応答スペクトル値の比(応答スペクトル比)が全周期帯で0.85以上、応答スペクトル強さの比(SI比)が1.0以上。

応答スペクトル比



応答スペクトル比(水平成分)



応答スペクトル比(鉛直成分)

応答スペクトル強さの比(SI比)

模擬地震波	SI比
水平成分	1.01
鉛直成分	1.01

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

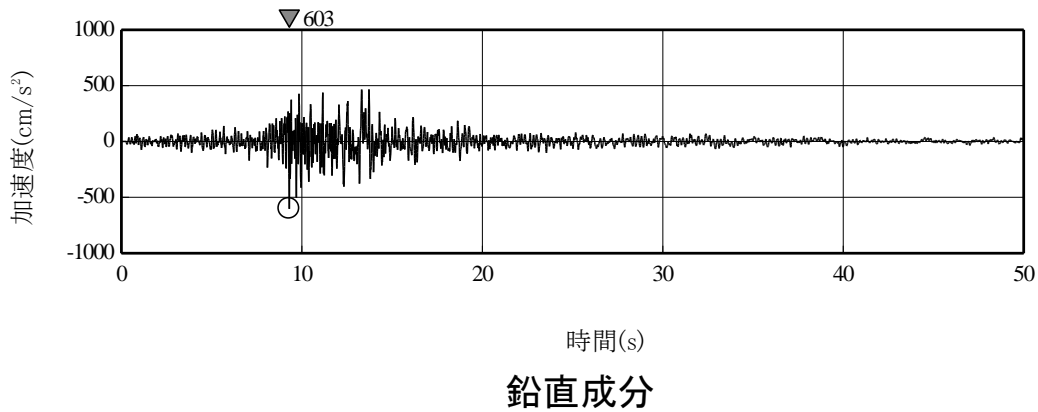
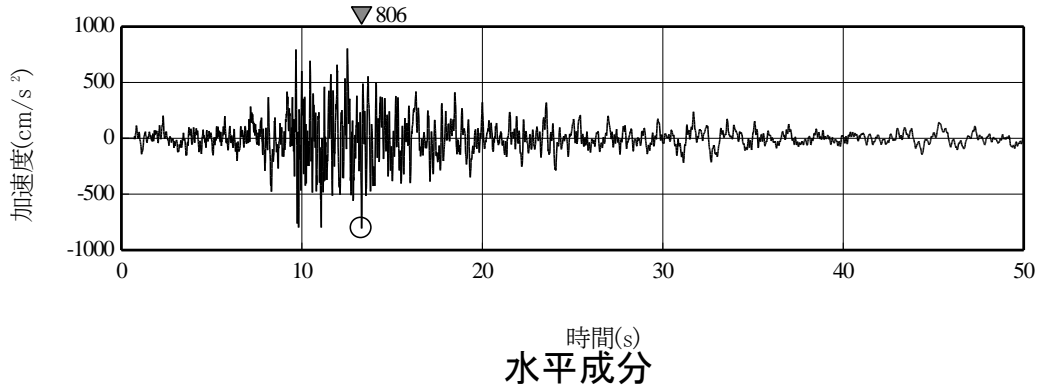
$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T)}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T)} \geq 1.0$$

ただし、
 $R(T)$: 応答スペクトル比
 T : 周期(s)
 $S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値
 $S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

ただし、
 SI : 応答スペクトル強さ
 $S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル
 $\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル
 T : 固有周期(s)

作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)²⁾に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

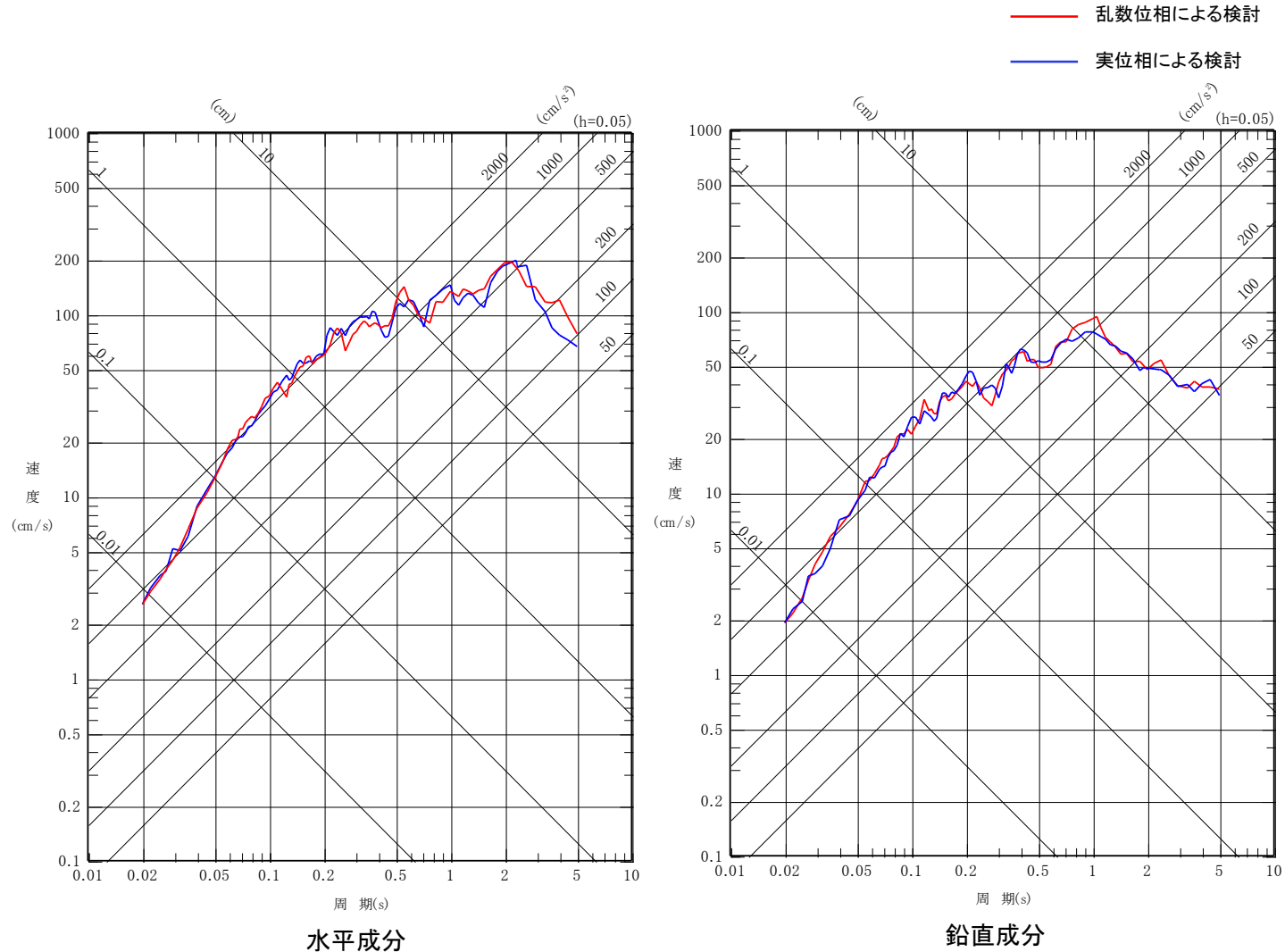
- 「乱数位相による検討」と同様に地盤応答解析を行い、解放基盤表面における地震動を評価した。
- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動(実位相による検討)の加速度波形を以下に示す。



解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動(実位相による検討)
 加速度波形

実位相による検討(乱数位相と実位相による検討結果の比較)

- 「乱数位相による検討」と「実位相による検討」について、解放基盤表面における地震動の応答スペクトルを以下に示す。
- 「実位相による検討」のスペクトル形状は、乱数位相による検討結果と同程度であり、双方の結果は整合していることから乱数位相による検討結果の妥当性を確認した。



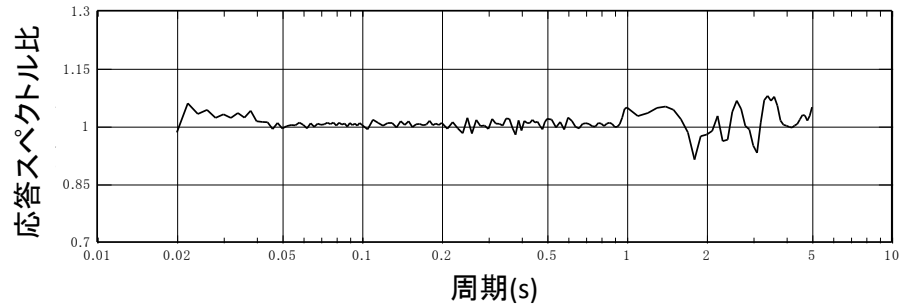
- 1) Shizuo Noda, Kazuhiko Yashiro, Katsuya Takahashi, Masayuki Takemura, Susumu Ohno, Masanobu Tohdo, Takahide Watanabe. RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES. OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis, Istanbul, 16-18 October, 2002.
- 2) 日本電気協会(2015): 原子力発電所耐震設計技術指針、JEAG4601-2015.
- 3) 加藤研一、武村雅之、八代和彦(1998): 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域特性、地震第2輯、51巻、123-138.
- 4) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書、令和元年8月7日.
- 5) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書 参考資料 標準応答スペクトルに係る検討について、令和元年8月7日.

補足資料

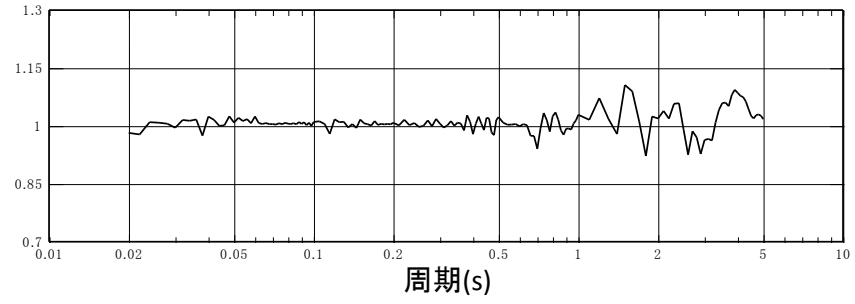
1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比
2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比

「乱数位相による検討」における模擬地震波について、耐震評価に関係する短周期側の応答スペクトル比(0.02s~0.05s)の適合度を向上させるため、模擬地震波を見直した。

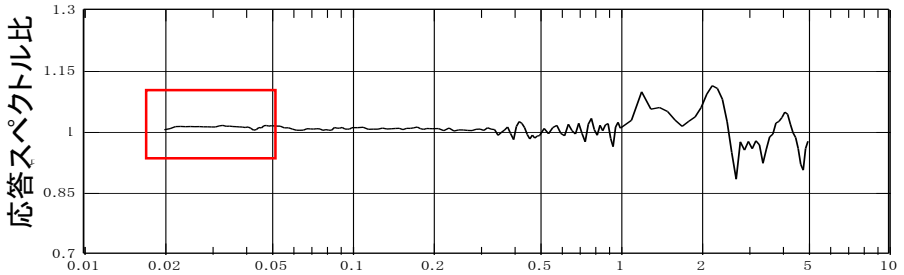


水平成分

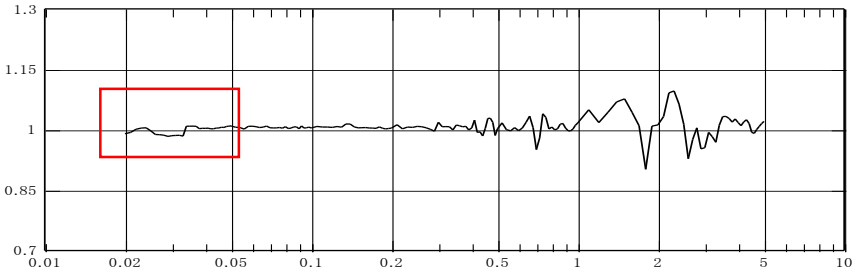


鉛直成分

標準応答スペクトルに対する応答スペクトル比(2021年9月3日審査会合)



水平成分



鉛直成分

標準応答スペクトルに対する応答スペクトル比(今回作成した応答スペクトル比)

補足資料

1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比
2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



1. 基準地震動 S_s の策定の概要
2. 敷地周辺の地震発生状況
3. 地下構造評価
 - 3.1 評価の方針
 - 3.2 敷地の解放基盤表面の設定
 - 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討
 - 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定
 - 3.5 観測記録及び模擬入力波を用いた敷地地盤の振動特性評価
4. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動
 - 4.1 プレート間地震
 - 4.2 海洋プレート内地震
 - 4.3 内陸地殻内地震
5. 震源を特定せず策定する地震動
6. 基準地震動 S_s の策定
7. 基準地震動 S_s の年超過確率の参照

参考資料

震源を特定せず策定する地震動(Mw6.5以上の地震に関する検討)

参考文献



3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

検討の概要

【目的】 敷地で得られた単点微動観測記録により「敷地地盤における基盤の拡がり及び速度構造の均質性の把握」、敷地周辺で実施した広域にわたる反射法・屈折法地震探査により「敷地周辺の深部地盤の速度構造の把握」、微動アレイ探査により「敷地周辺の深部地盤の最適な速度構造の把握」、地震波速度トモグラフィ解析による「地震基盤以深の深部地盤の速度構造の推定」を実施する。

これらの探査、解析により、地震基盤を含む深部地盤の速度構造を把握する。

(1) 単点微動観測記録による検討

敷地内で等間隔に実施した単点微動観測で得られた地表の微振動観測記録を用いて算出されるH/Vスペクトルを整理することで、敷地地盤の速度構造の均質性及び敷地地盤における基盤の拡がりを確認する。

H/Vスペクトルによる検討

(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

敷地周辺において重力異常を参照して東西、南北に配置した探査線に沿って、反射法・屈折法地震探査を行い、3次元の深部地盤の空間分布を把握する。

弾性波探査によるP波速度分布、走時曲線の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

解放基盤表面から地震基盤面の速度構造を把握するため、敷地近傍で実施した微動アレイ探査記録から求める観測位相速度と、広域にわたる物理探査等から求める理論位相速度を参照して、最適な速度構造を求める。

観測位相速度と理論位相速度による最適化検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

各地の地震観測点で記録された自然地震（主に微小～小地震）の波形記録から到達時刻を読み取ることで得られる観測走時をターゲットに、解析モデルによる計算走時を最適化することで地震基盤以深の深部地盤の速度構造を推定する。

自然地震の観測走時と解析モデルによる最適化検討



地震基盤面を含む深部地盤の速度構造を推定することにより、敷地周辺の3次元的地盤構造の把握及び深部地盤モデルの設定に資することができる



2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(1) 単点微動観測記録による検討

■ H/Vスペクトルに関する検討方法

【検討の目的】

敷地において実施した単点微動計測によるH/Vスペクトル比を計算し、各観測点の振動特性を評価することにより、敷地直下の速度構造の均質性や基盤の拡がりを確認する。

【算出方法】

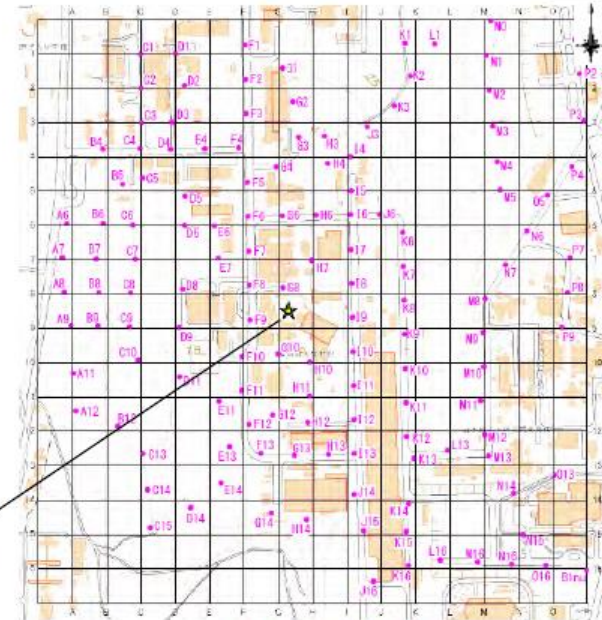
- 微動測定時間は、1地点につき15分間
- 観測時間分のデータを4096サンプル(40.96秒)ごとに20.48秒ずつオーバーラップさせながらセグメントに分割し、0.1HzのParzen windowを用いてデータを作成
- 区間ごとにフーリエ変換を実施し、水平両成分を相乗平均した観測H/Vスペクトル比を計算

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{UD}$$

JRR-3原子炉建家

・約50m格子間隔で単点微動計測を実施

調査(B)



原科研の測定位置図



地震計LE-3D/5S レナーツ社(独)
<http://www.lennartz-electronic.de/>



記録器 LS-8800 白山工業
<http://www.hakusan.co.jp/>

機器	機器名	製造会社	仕様	数量
地震計	LE-3D/6S	レナーツ社(独)	速度型上下・水平3成分	6
			固有周期・5/7秒切り替え式	
			電圧:DC12V	
記録器	LS-8800	白山工業	出力感度:4V/kine	6
			チャンネル数:3	
			分解能:24ビット	
			GPS時計内蔵	
			電圧:DC6.5~16V	

測定時間	15分
固有周期	7秒
サンプリング周波数	100Hz

微動計測器の機器特性



2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

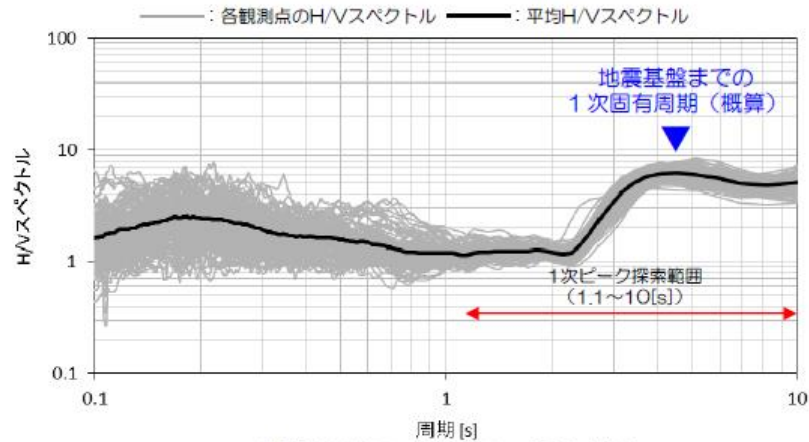
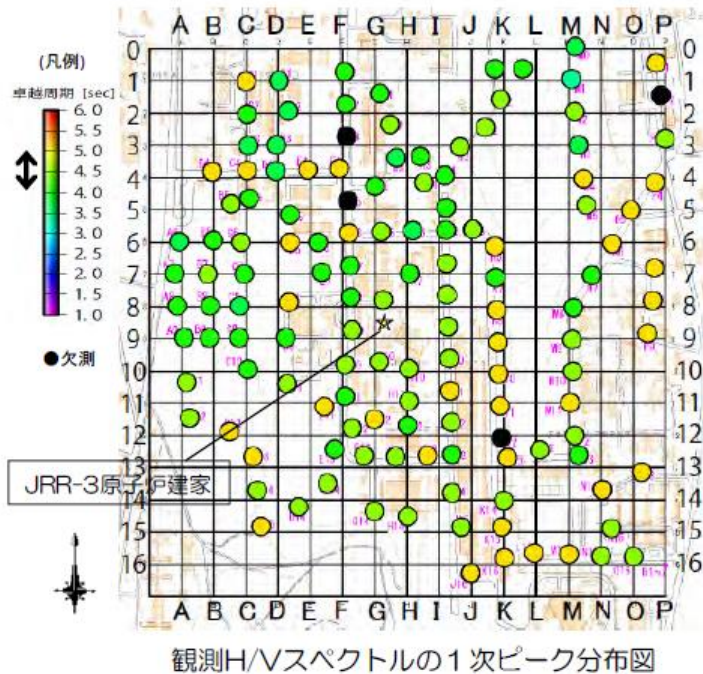


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(1) 単点微動観測記録による検討

■ 単点微動観測によるH/Vスペクトルの検討結果のまとめ

観測H/Vスペクトルはばらつきが少ないことが確認でき、敷地全体の観測点において概ね同様の傾向を示すことが確認できた。



観測H/Vスペクトルの重ね描き

地盤構造モデルから下記簡易式を用いて、地震基盤面までの1次固有周期を算出すると周期約4.6秒となる。

$$T_i = \frac{4H_i}{V_i} \quad V_i = \frac{\sum(V_{si} \cdot L_i)}{H_i}$$

ここで、 T_i : i 層までの1次固有周期(s)、
 H_i : i 層までの深度(m)、
 V_i : i 層までの平均せん断波速度(m/s)、
 V_{si} : i 層のせん断波速度(m/s)、
 L_i : i 層の層厚(m)

敷地における観測H/Vスペクトルについて、概ね同じようなスペクトル形状であることから、敷地地盤に局所的な速度構造はないと考えられる。また、地震基盤相当のスペクトルピークも安定して得られており、敷地直下の地震基盤面はほぼ等深度で一様に広がっていると考えられる。



3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

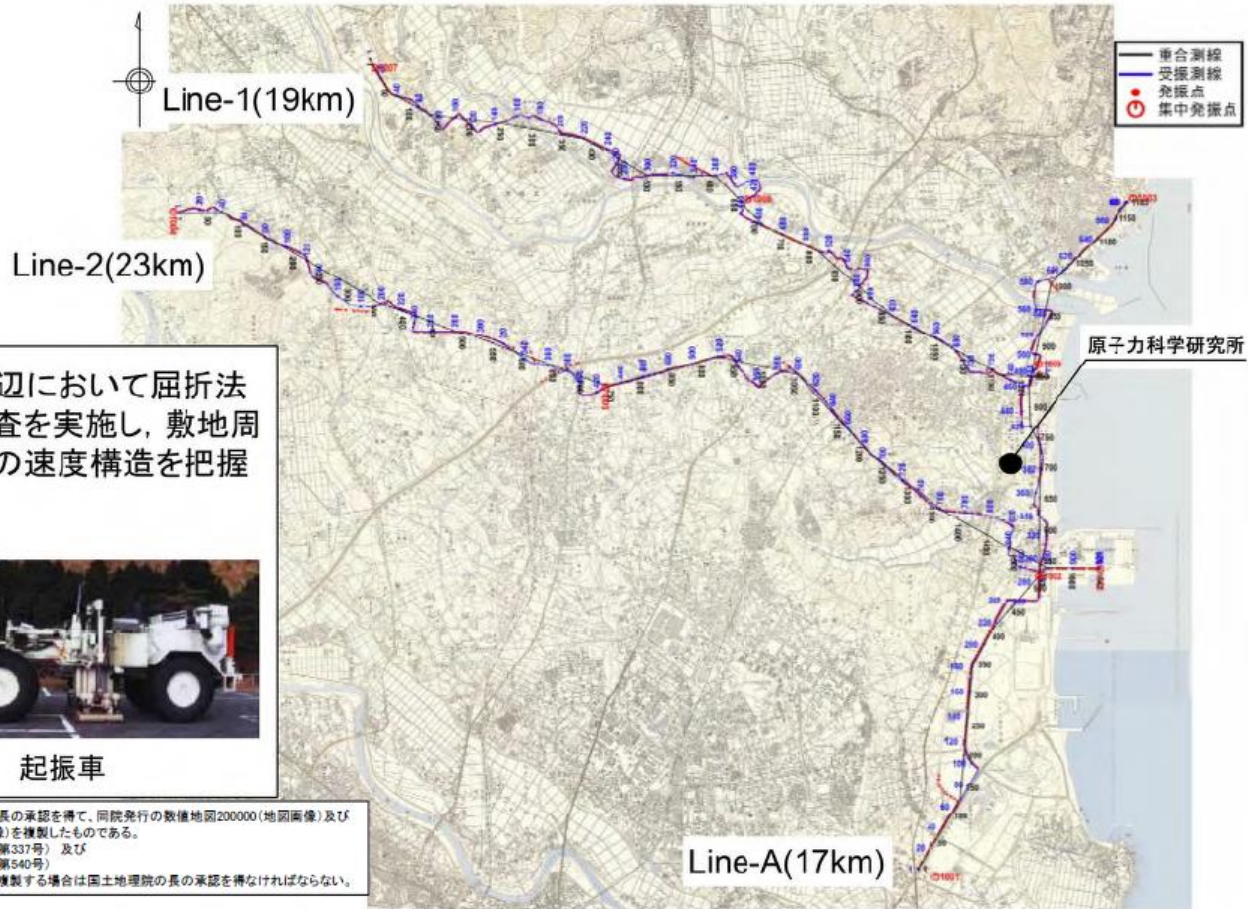
(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

第101回審査会合
資料1-1 再掲

調査(C)

■ 地震探査側線の配置

地震探査の配置を下図に示す。東西方向をLine-1及びLine-2、南北方向をLine-Aとする。



2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

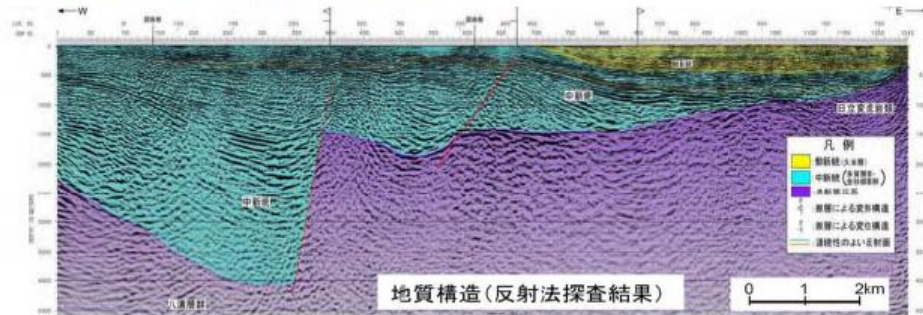


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

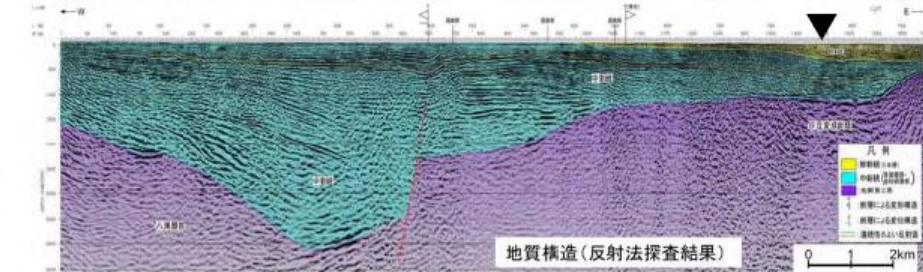
(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

■ 地震探査結果に基づく基盤構造探査結果及びまとめ

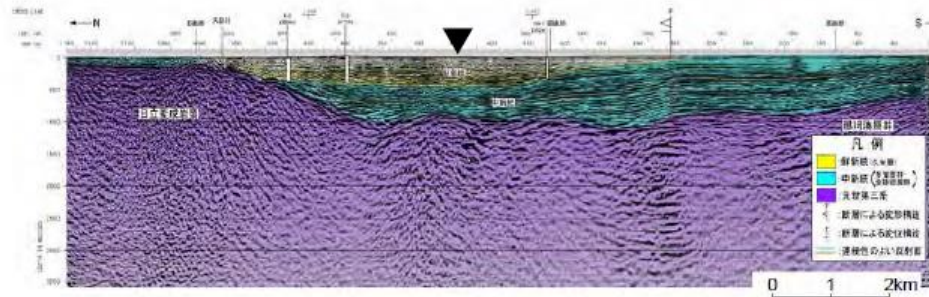
Line-1 (東西)



Line-2 (東西)



Line-A (南北)



▼ : 原科研

敷地周辺の反射法・屈折法地震探査の結果から、敷地周辺の3次元的な深部地盤の空間分布を把握した。



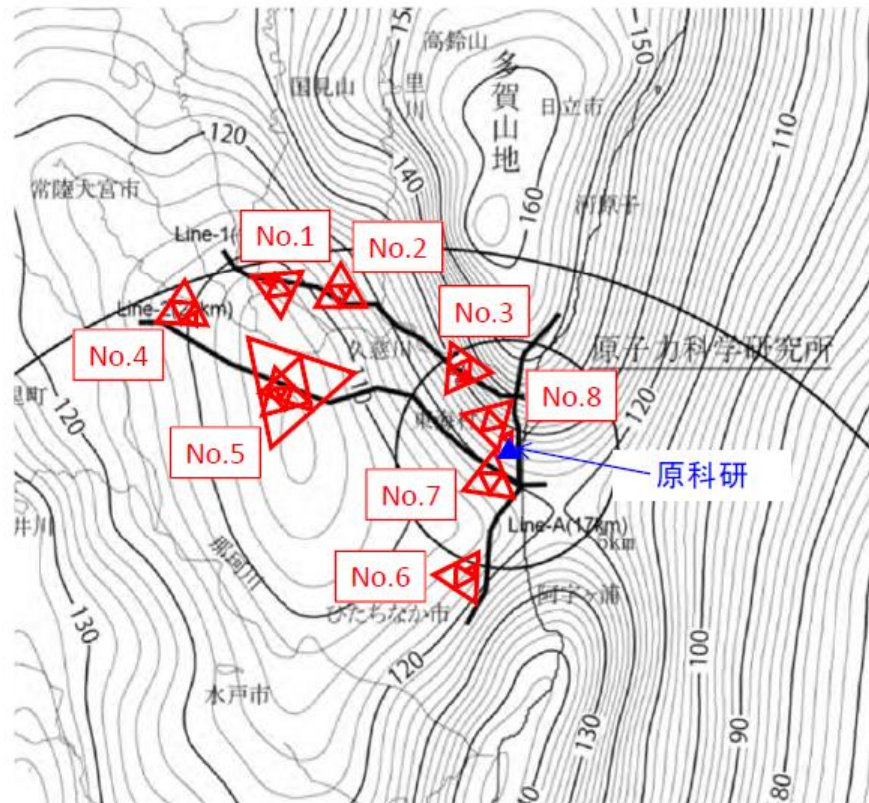
3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査位置と目的

調査(D)

- ① 敷地周辺 (No.1~6) の微動アレイ探査の主な目的
微動アレイ探査とは別の完全に独立した地球物理学的調査である「反射法・屈折法地震探査(Line-1(18km),Line-2(22km),Line-A(17km))」による調査結果との対比を行う。
- ② 敷地近傍 (No.7、No.8) の微動アレイ探査の主な目的
敷地周辺と同様に地球物理学的調査結果との比較の他、解放基盤表面から地震基盤にかけての速度構造を把握する。



- ③ 重力異常との関係
反射法・屈折法探査のラインは、重力異常の勾配と敷地の位置関係を参考に決定しており、微動アレイ探査の結果と重力異常の傾向が調和的であることを確認する。

微動探査に用いた微動計



微動アレイ探査位置
(コンターは重力異常分布)

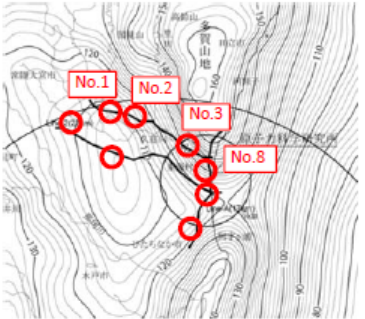


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

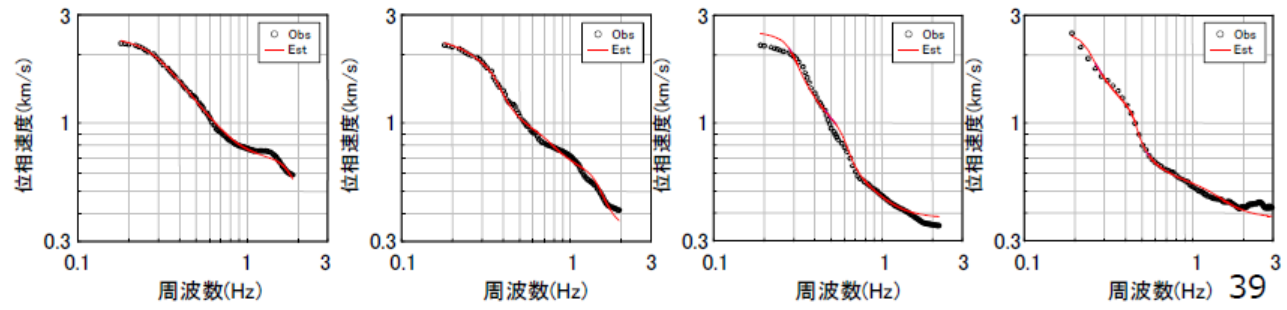
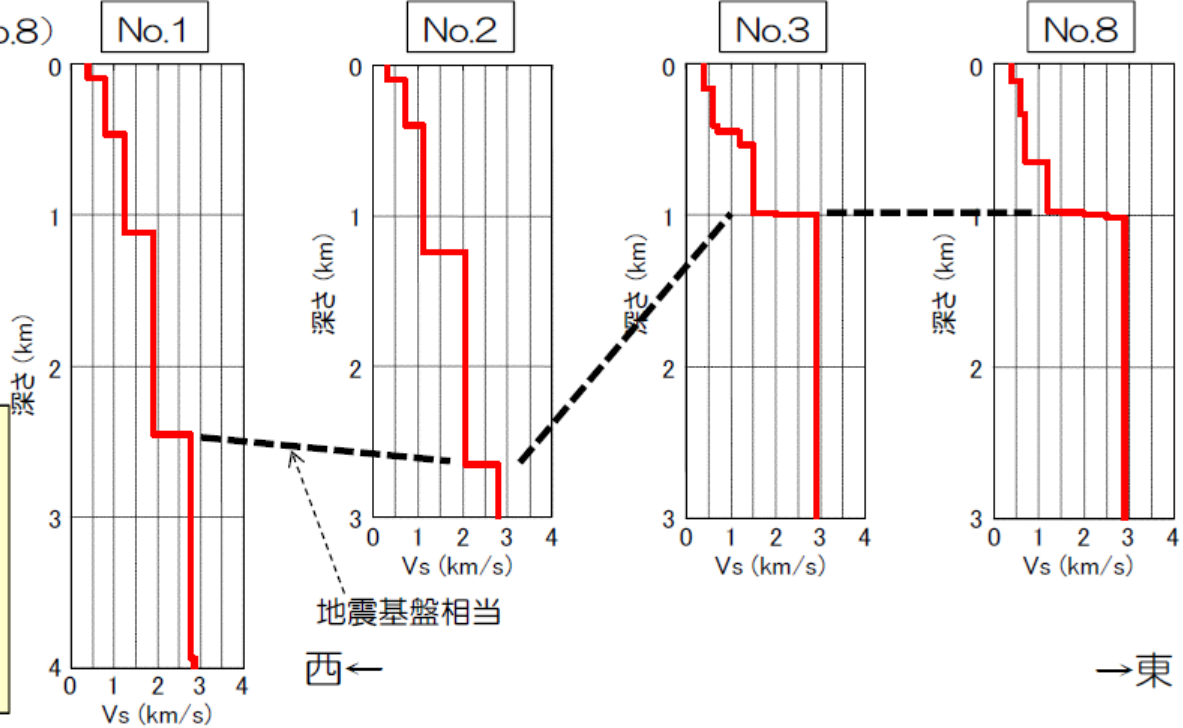
(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査結果(1/3)

① 東西方向 (No.1~No.8)



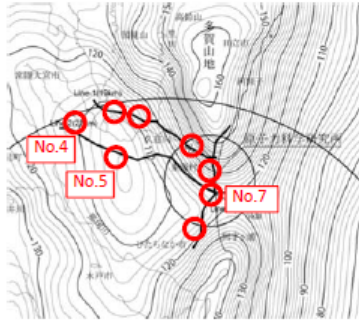
地震基盤相当深度
($V_s \approx 3\text{km/s}$) に着目すると、No.1からNo.2にかけて若干下降した後、No.3にかけて上昇し、その後、No.8に向かってほぼ水平に推移する様子が見て取れる。これは、重力異常分布の傾向と同様である。



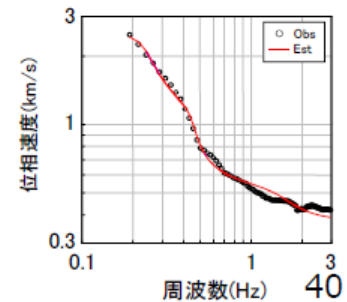
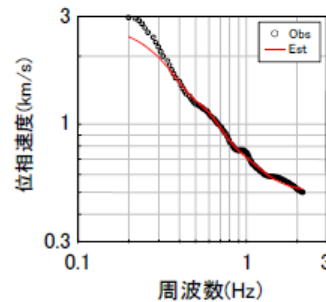
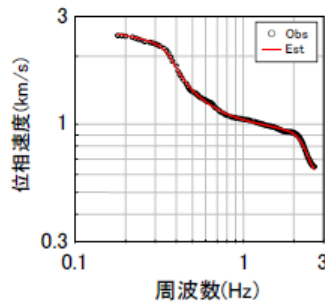
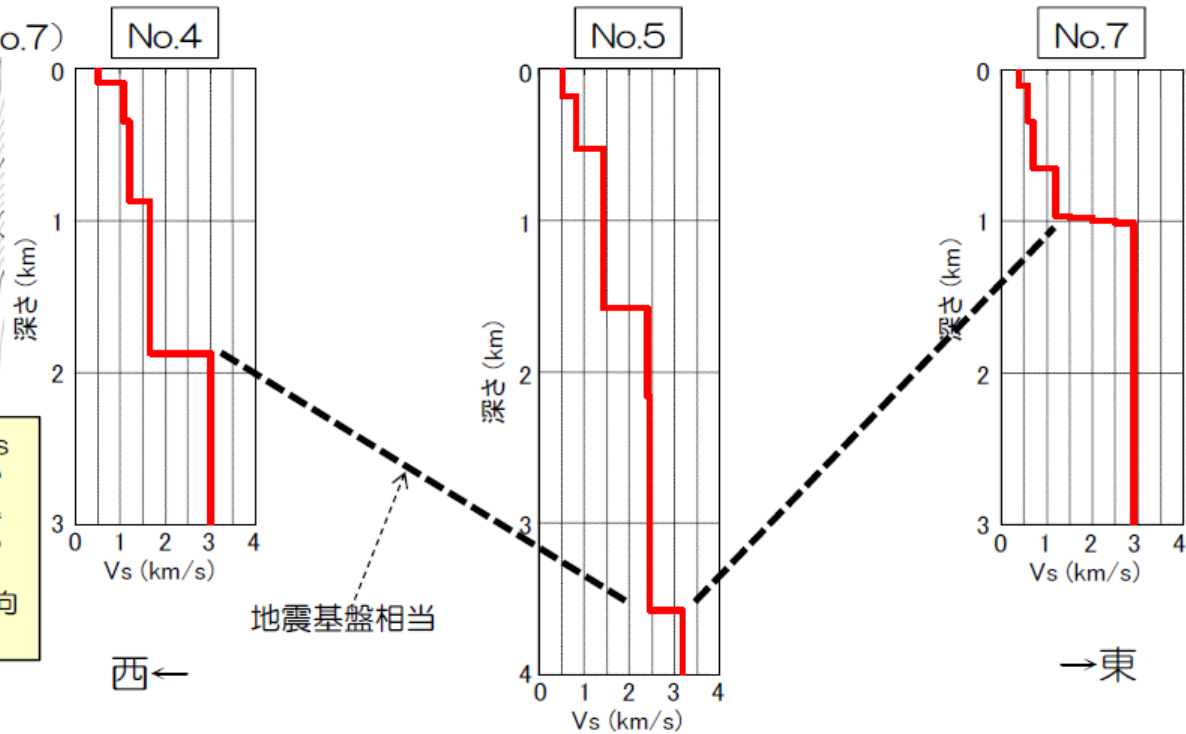
(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査結果(2/3)

② 東西方向 (No.4~No.7)



地震基盤相当 ($V_s \approx 3\text{km/s}$ 層) に着目すると、No.4からNo.5にかけて一旦沈み込み、No.7にかけて上昇する様子が見て取れる。これは、重力異常分布の傾向と同様である。





2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

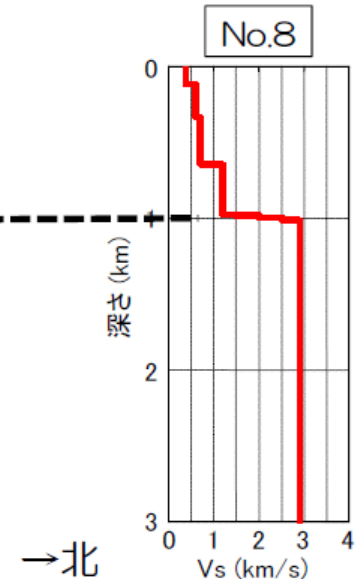
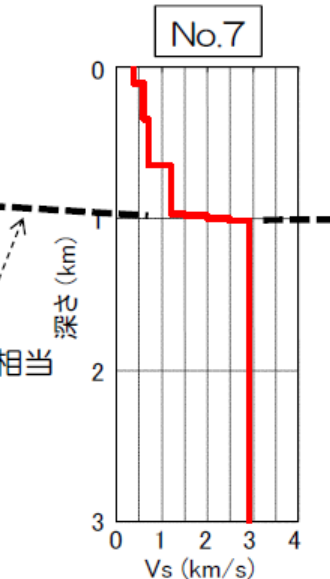
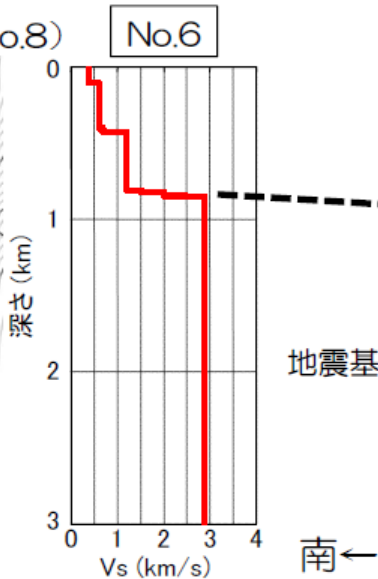
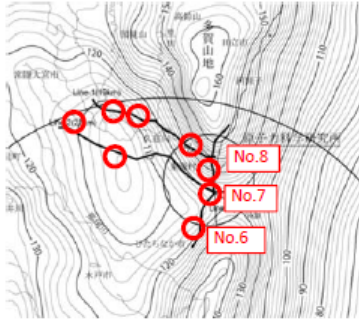


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査結果(3/3)

③ 南北方向 (No.6~No.8)

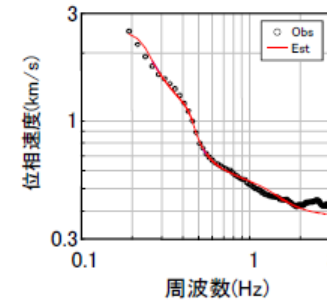
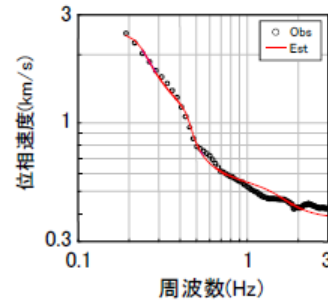
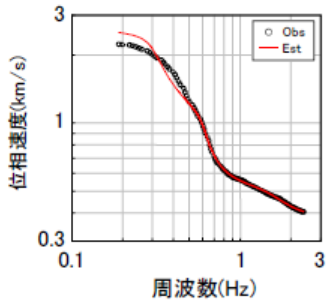


地震基盤相当

南←

→北

地震基盤相当
($V_s \approx 3\text{km/s層}$)に
着目すると、No.6から
No.8にかけてほぼ
水平に推移している
様子が見て取れる。
これは、重力異常分
布の傾向と同様であ
る。





3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

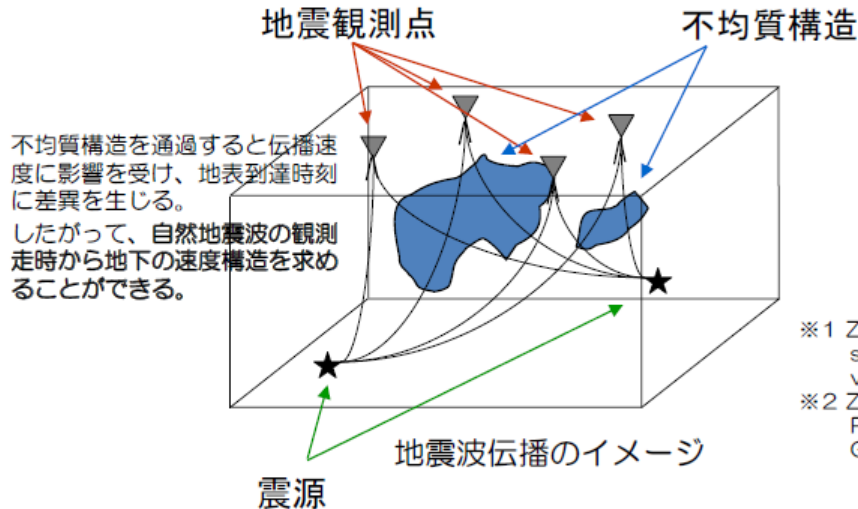
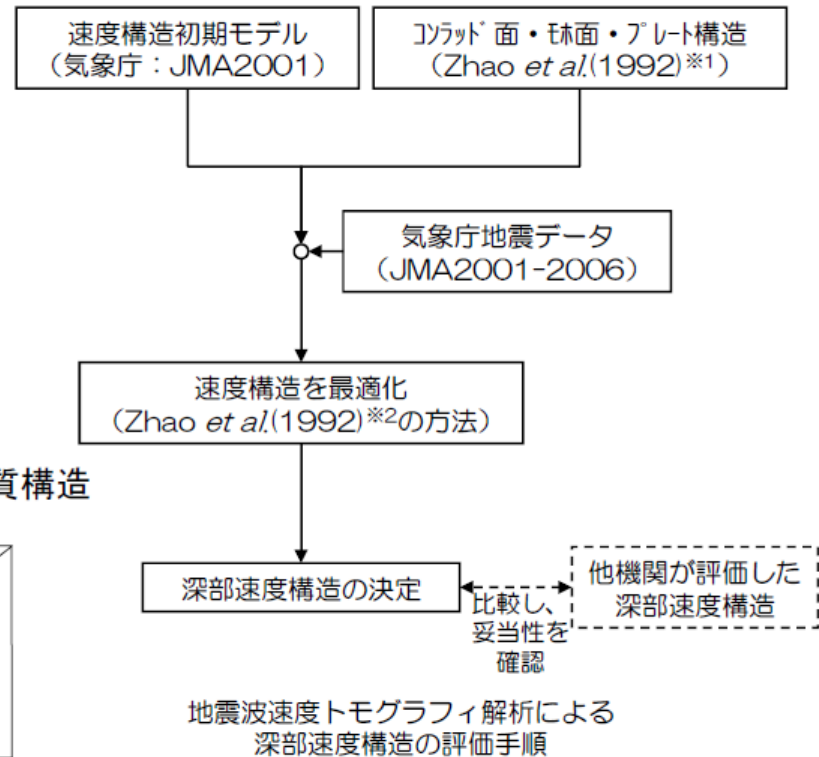
(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 地震波速度トモグラフィ解析の概要

調査(E)

地震基盤面以深の深部地盤の速度構造を把握するため、文献による大規模な地殻構造(コンラッド面、モホ面、プレート)に対して、観測事実にもとじた最適な速度構造を求める。

そのために、各地の地震観測点で記録された自然地震(主に微小~小地震)の波形記録から到達時刻を読み取ることで得られる観測走時をターゲットに、モデルによる計算走時を最適化することで深部の速度構造を評価する「地震波速度トモグラフィ解析」を用いた。



*1 Zhao, D., S. Horiuchi and A. Hasegawa(1992) : Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands, Tectonophysics, vol.212, pp.289-301.

*2 Zhao, D., A. Hasegawa and S. Horiuchi(1992) : Tomographic Imaging of P and S Wave Velocity Structure Beneath Northeastern Japan, J. Geophys. Res., vol.97, No.B13, pp.19,909-19,928.

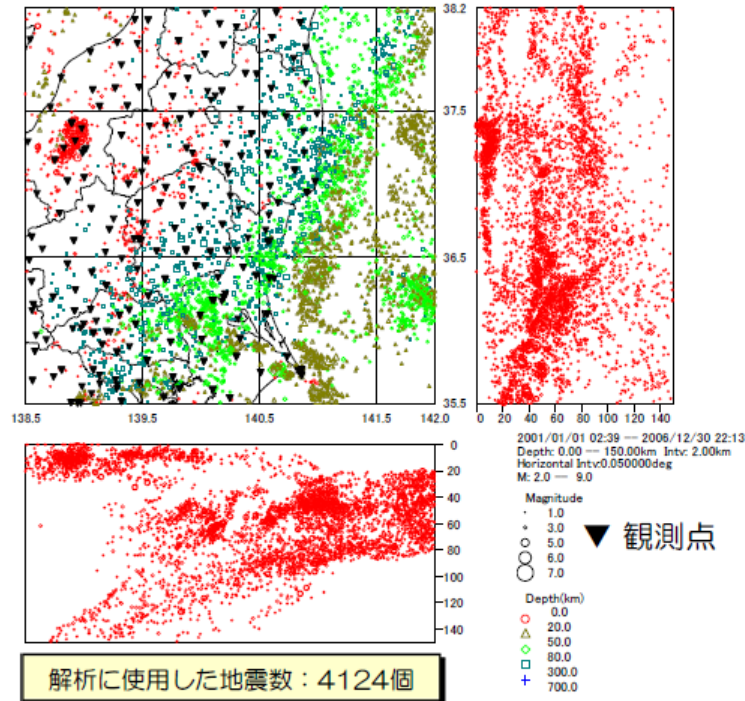


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

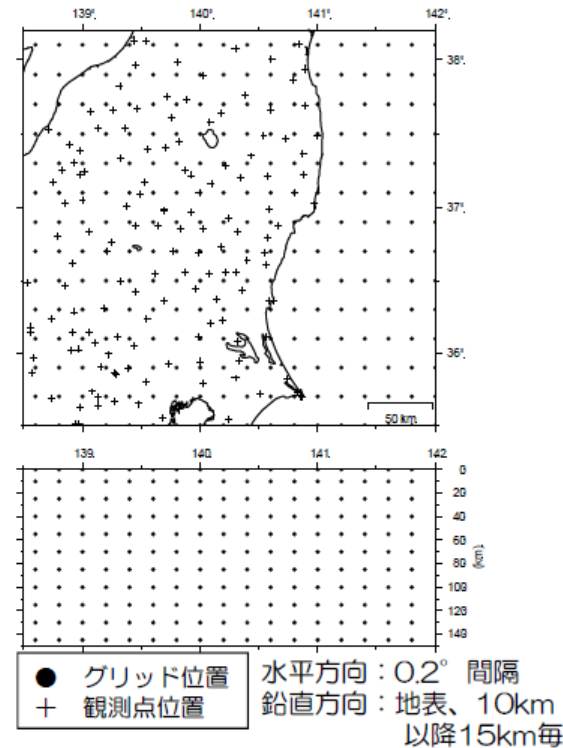
(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 地震波速度トモグラフィ解析において使用した地震・観測点位置と解析範囲

- 解析に使用した地震と観測点及び震源位置は、気象庁・地震カタログに依った（2001-2006年）。
- M2以上の地震を対象に、水平 0.05° 、深さ2kmの領域で最も観測点数が多い地震を選択。さらに、震源深さの決定精度が1.5km以下の地震を選択。
- 解析領域内の格子点に初期の速度値を与え、観測走時と計算走時の誤差が最小となるように最適解を求める。
- 解の信頼性についてはレゾリューション行列の対角要素の値を指標とする。Aki and Lee(1976)によると、50%以上であれば解の信頼性は高いとされる。



解析において使用した地震・観測点位置



解析の範囲

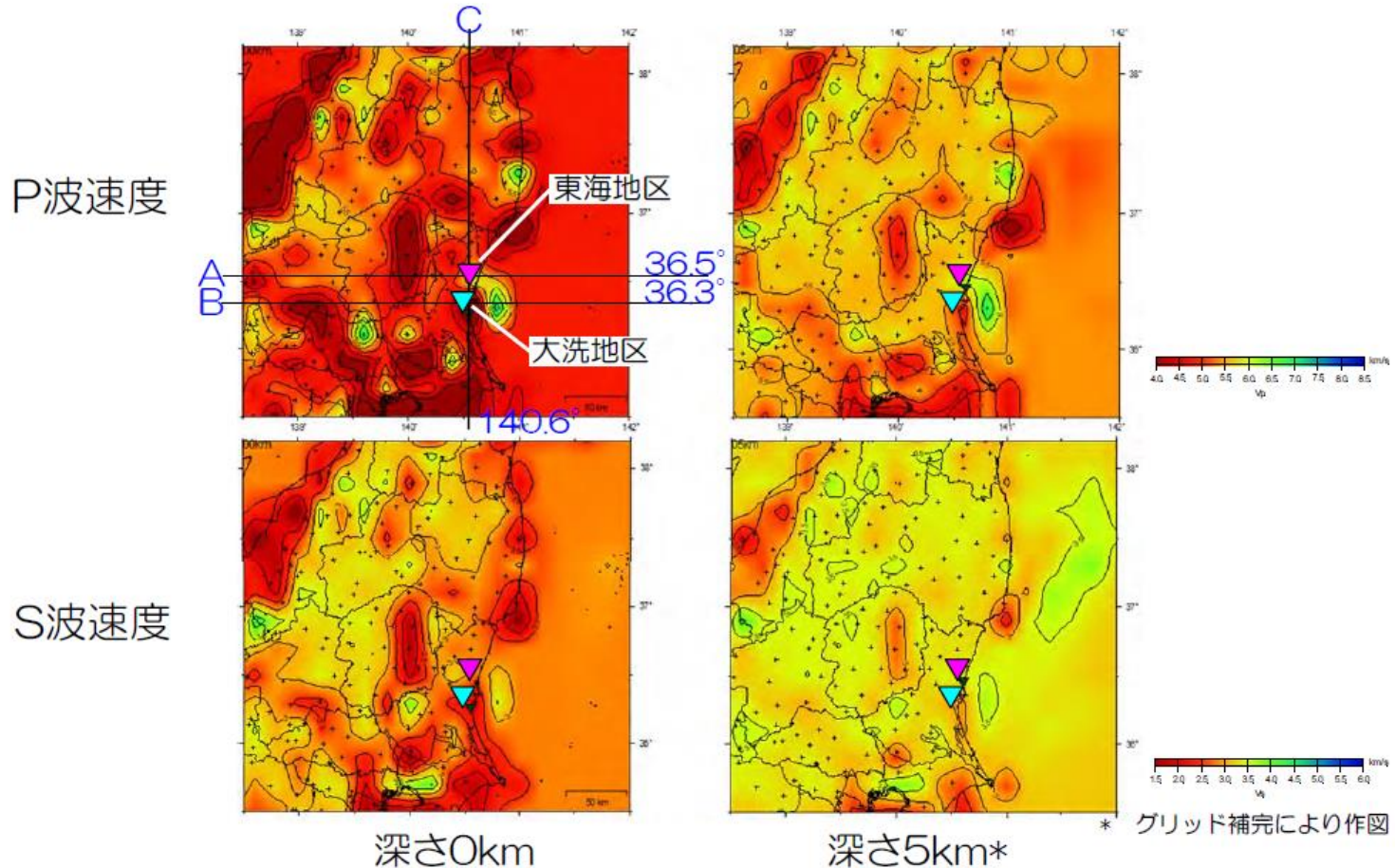


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(平面：1/2)

浅部 (~5km)の平面的速度分布を以下に示す。各地域のP波速度及びS波速度が推定された。



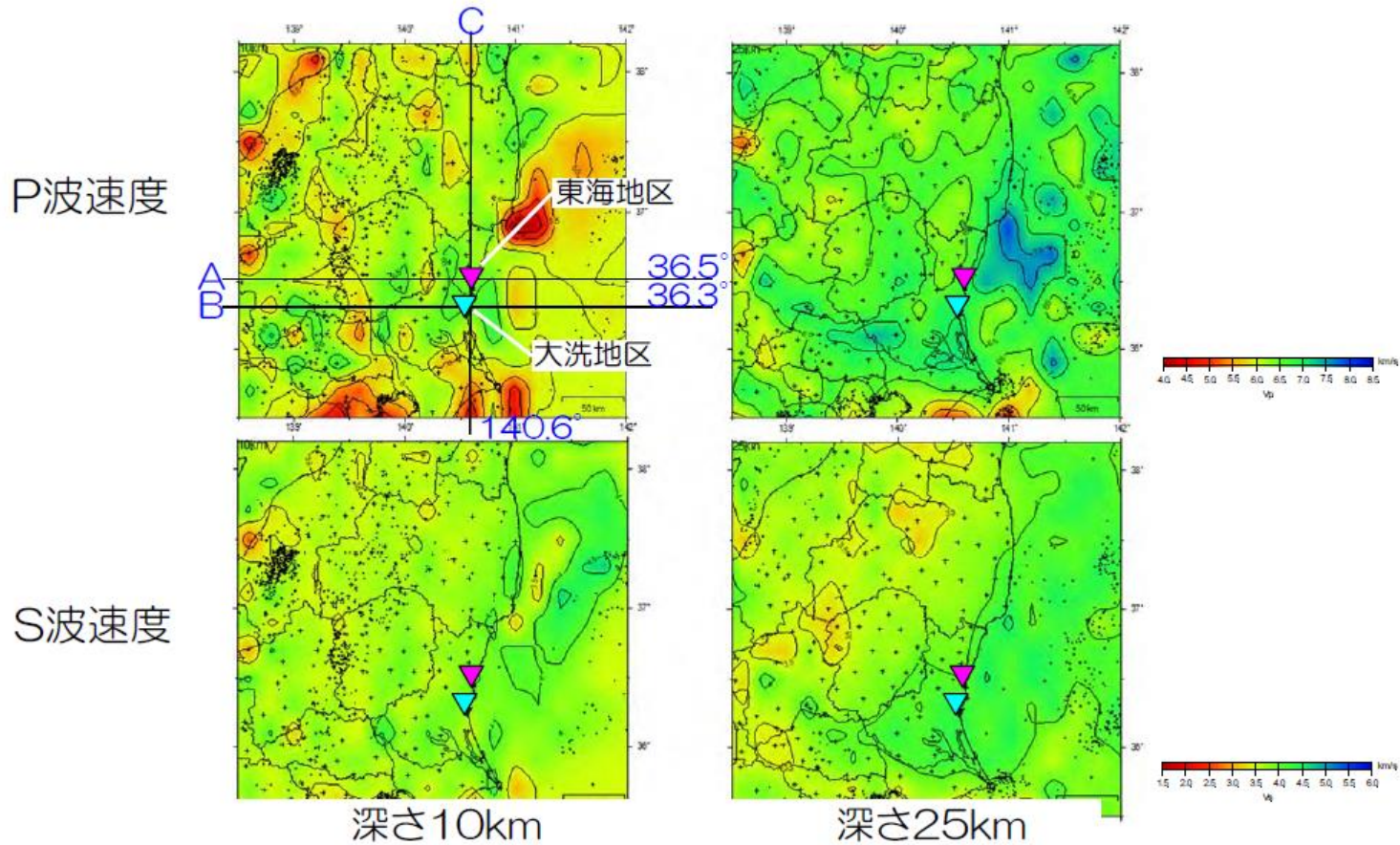


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(平面：2/2)

深部(10~25km)の平面的速度分布を以下に示す。各地域のP波速度及びS波速度が推定された。



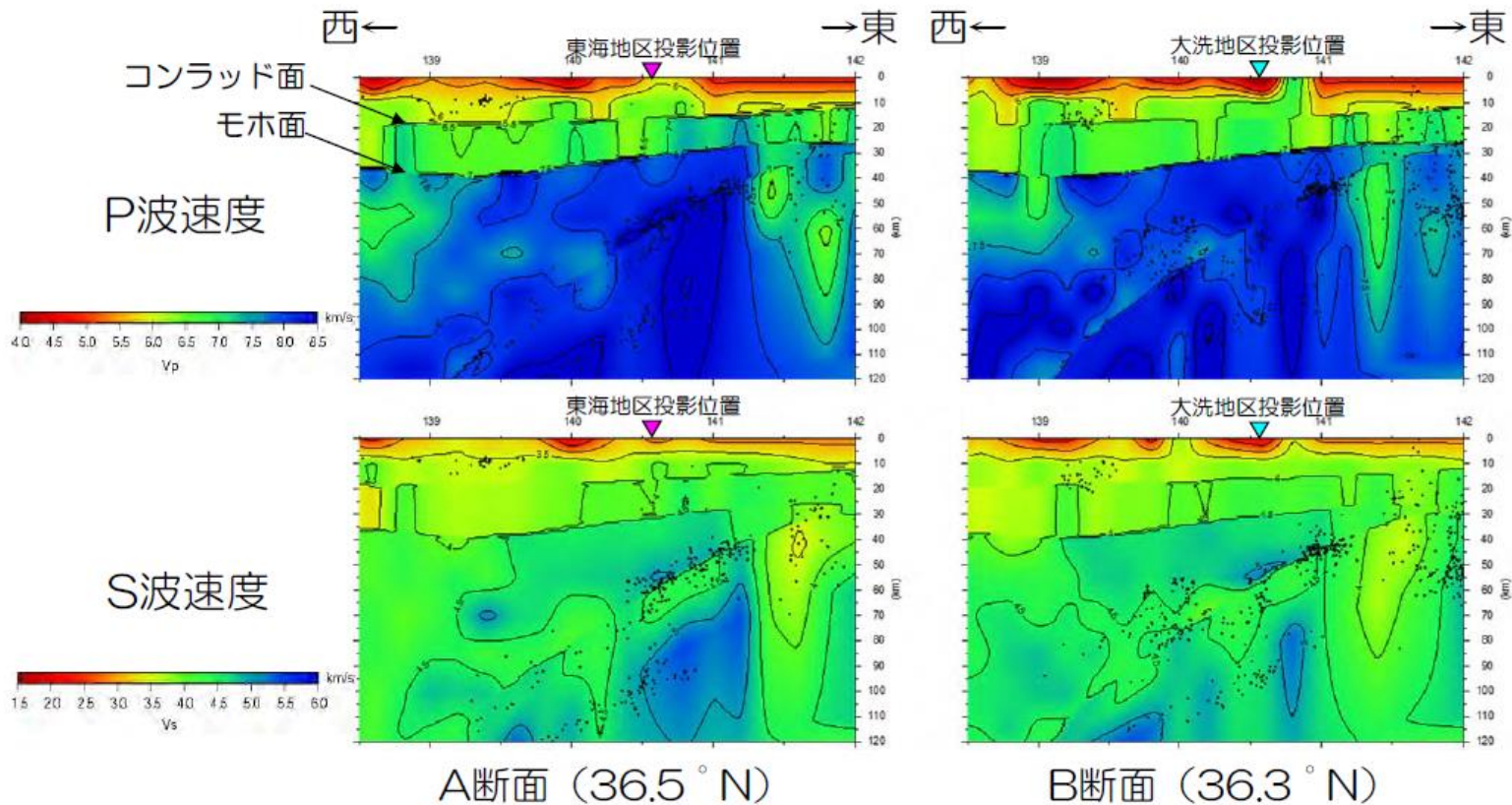


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(断面：1/2)

東西断面の速度分布を以下に示す。各深度のP波速度及びS波速度が推定された。



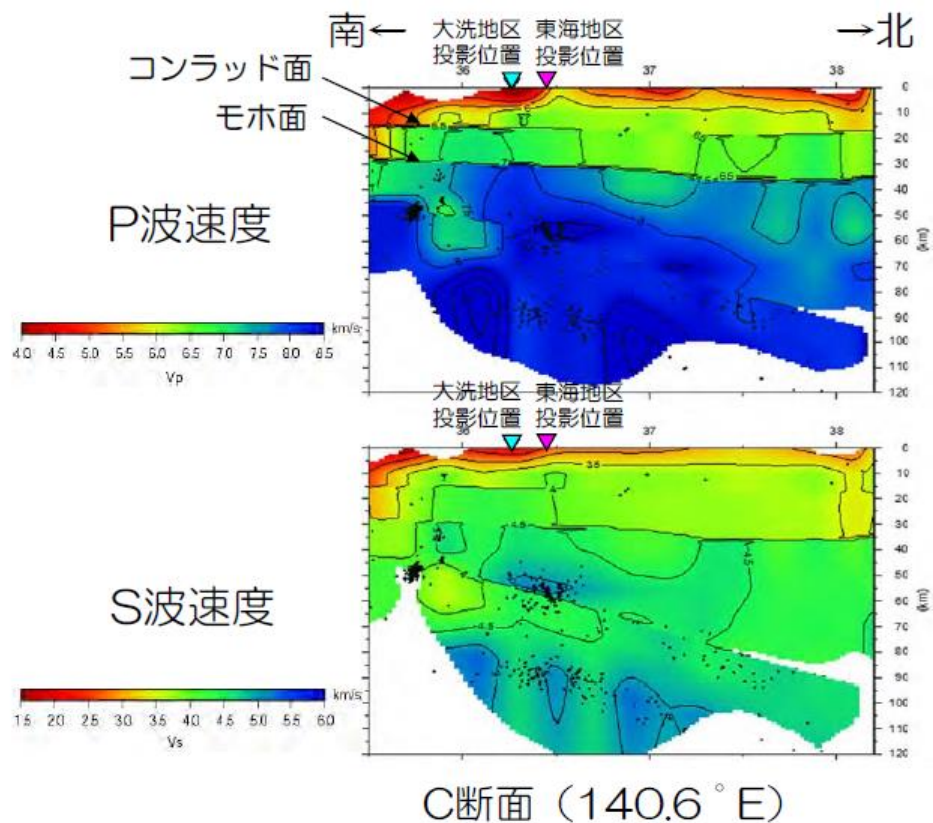


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 解析結果(断面：2/2)

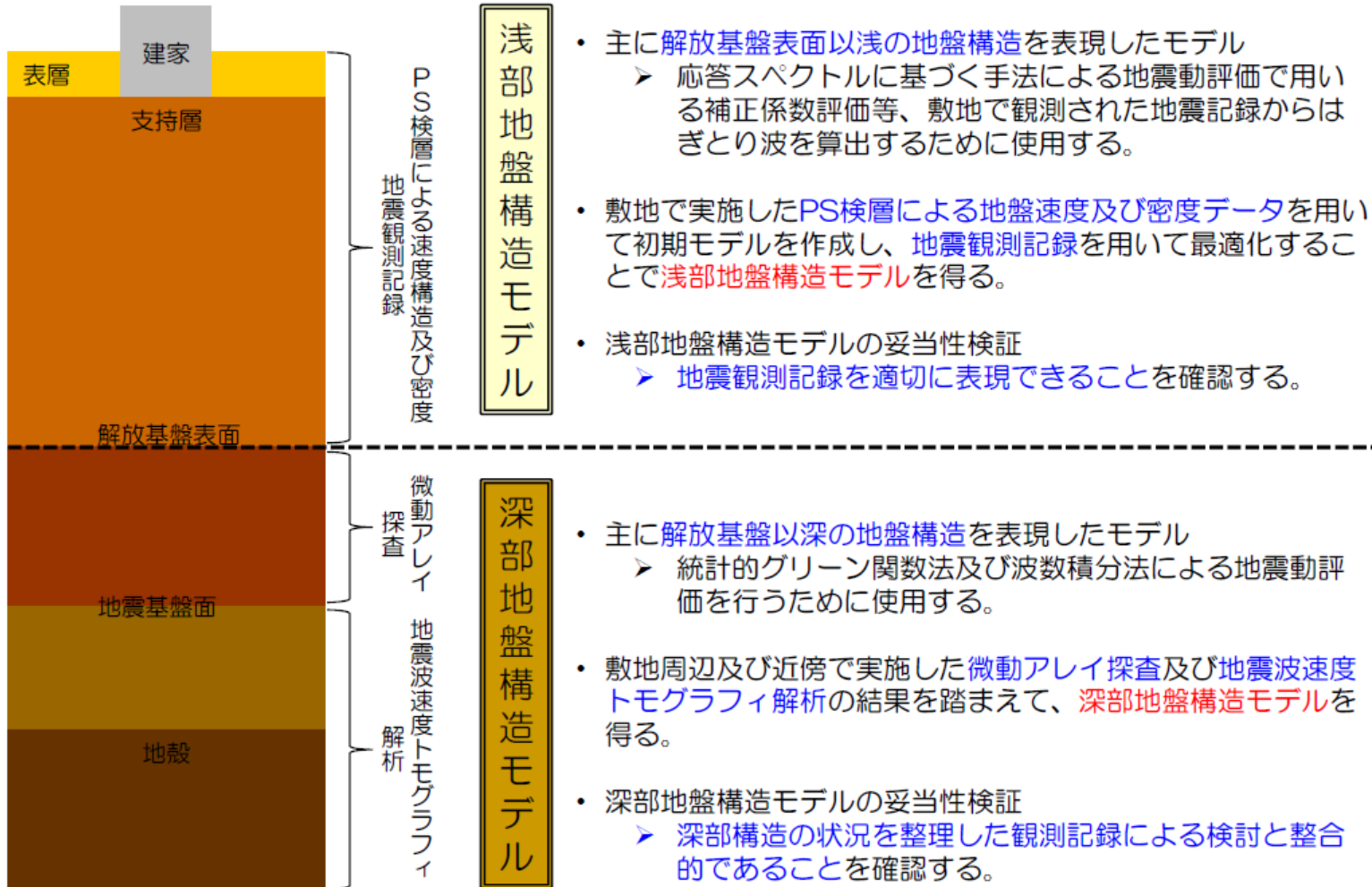
南北断面の速度分布を以下に示す。各深度のP波速度及びS波速度が推定された。





3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

設定の概要





3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定
浅部地盤構造モデルの設定手順

東北地方太平洋沖地震は、敷地において観測された最大の地震であり、地盤の非線形化を考慮し、この地震に特化した地盤構造モデルを作成

初期地盤構造モデルの作成

地震観測点近傍で実施したPS検層による地盤速度及び密度データを用いて初期地盤構造モデルを作成



浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

東北地方太平洋沖地震発生以降の敷地地盤の状態を考慮した中小規模の観測地震による浅部地盤構造モデルを作成
地盤構造の平均的な像をモデル化するため、5つの標準的な地震を用いて、水平・鉛直成分の地盤構造モデルを作成

- 2011年3月11日 15:15 茨城県沖の地震 (東北地方太平洋沖地震の最大余震) (M7.6)
- 2011年3月22日 18:19 福島県沖の地震 (M6.4)
- 2011年4月11日 17:16 福島県浜通りの地震 (M7.0)
- 2011年4月12日 8:08 銚子付近の地震 (M6.4)
- 2011年4月13日 10:07 福島県浜通りの地震 (M5.7)

得られた地盤構造モデルに対して、地震観測記録のシミュレーション解析を行い、そのモデルの妥当性を検証



浅部地盤構造モデル

解放基盤波を用いる検討 (応答スペクトルに基づく手法による地震動評価に用いる補正係数の評価等) に使用

東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

敷地が経験した極めて大きな地震である東北地方太平洋沖地震を詳細に評価するため、NS・EW・UD成分毎に浅部地盤構造モデルを作成

得られた地盤構造モデルに対して、地震観測記録のシミュレーション解析を行い、そのモデルの妥当性を検証



東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデル

東北地方太平洋沖地震の本震の解放基盤波の評価に使用



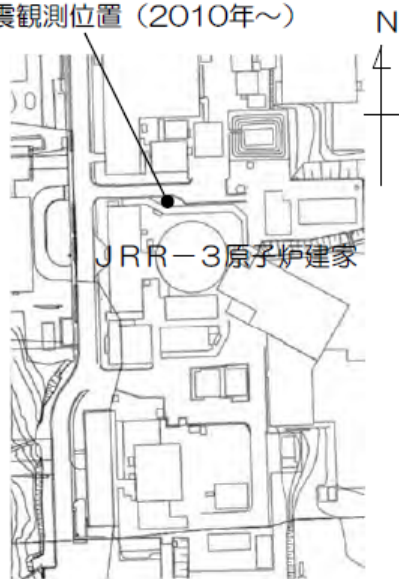
3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

初期地盤構造モデルの作成

■ 初期地盤構造モデルの諸元

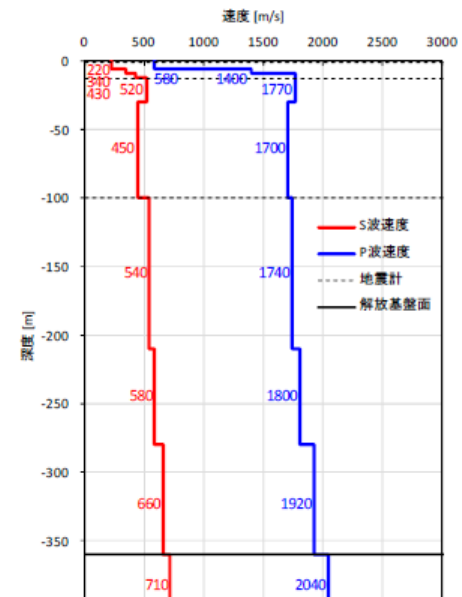
浅部地盤構造モデルを評価するために作成する初期の地盤構造モデルについては、2章で設定した解放基盤表面を基本とし、地震観測位置の近傍で実施した各種地質調査のデータを用い、層厚・密度・せん断波速度を設定した。

地震観測位置 (2010年～)



上面 G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	初期値		
			S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	
▽ 0	1	1.97	220	580	
▽ -1	5	1.97	220	580	
	-6	3	340	1400	
	-9	3	1.77	430	1770
▽ -12	1	1.82	520	1770	
▽ -13	17	1.82	520	1770	
	-30	70	1.73	450	1700
▽ -100	110	1.73	540	1740	
	-210	70	1.75	580	1800
	-280	80	1.78	660	1920
▼ -360	∞	1.86	710	2040	

▽ : 地震計位置
▼ : 解放基盤面位置





3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

■ 地盤同定解析の諸条件及び浅部地盤構造モデルの評価結果

東北地方太平洋沖地震以降に発生した5つの地震観測記録を用いた地盤同結果から得られた浅部地盤構造モデルの諸元を下表に示す。

- 一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- ターゲットは、フィルタ処理（Parzenウィンドウ(0.2Hz)）を施した、観測記録の伝達関数
- 同定対象は各層の速度、及び表層(GL-9m以浅)、上部層(GL-9m~100m)、下部層(GL-100m以深)の減衰定数
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた10回の計算を実施し、最も適合度のよい計算結果を最適地盤モデルして採用
- 探索範囲は以下の通り設定
 - 【速度】
表層：初期モデルの0.8~1.0倍
上部層：初期モデルの0.8~1.2倍
下部層：初期モデルの0.8~1.2倍
(ただし、解放基盤表面以深は固定)
 - 【減衰定数】
 $h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$
 h_0 は0.0~1.0
 α は0.0~2.0
- 地震毎に評価された最適地盤モデルのうち、NS成分及びEW成分を平均化することで水平成分のモデルとした

上面 G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	水平方向				鉛直方向		
			S波速度 (m/s)	減衰定数*		P波速度 (m/s)	減衰定数*		
				h_0	α		h_0	α	
0	1	1.97	192			504			
-1	5	1.97	199	0.732	1.053	470	0.546	0.531	
-6	3	1.92	333			1196			
-9	3	1.77	487	0.286	1.478	1650	0.987	1.081	
-12	1	1.82	559			1603			
-13	17	1.82	483			1764			
-30	70	1.73	494			1967			
-100	110	1.73	542	0.061	1.506	1825	0.408	1.788	
-210	70	1.75	619			1797			
-280	80	1.78	760			2119			
-360	∞	1.86	710			2040			

※ $h = h_0 \times f^{-\alpha}$ ここでfは周波数(Hz)

2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

■ 地盤同定解析の諸条件及び東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの評価結果

東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた地盤同結果から得られた東北地方太平洋沖地震用の浅部地盤構造モデルの諸元を下表に示す。

- 一次元波動論に基づく理論伝達特性を当てはめる逆解析により同定
- ターゲットは、フィルタ処理（Parzen ウィンドウ(0.2Hz)）を施した、観測記録の伝達関数
- 同定対象は各層の速度、及び表層(GL-9m以浅)、上部層(GL-9m~100m)、下部層(GL-100m以深)の減衰定数
- 遺伝的アルゴリズムを用い、初期乱数を変えた10回の計算を実施し、最も適合度のよい計算結果を最適地盤モデルして採用
- 探索範囲は以下の通り設定
【速度】
表層：初期モデルの0.8~1.0倍
上部層：初期モデルの0.8~1.2倍
下部層：初期モデルの0.8~1.2倍
(ただし、解放基盤表面以深は固定)

【減衰定数】

$$h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$$

h_0 は 0.0~1.0

α は 0.0~1.0

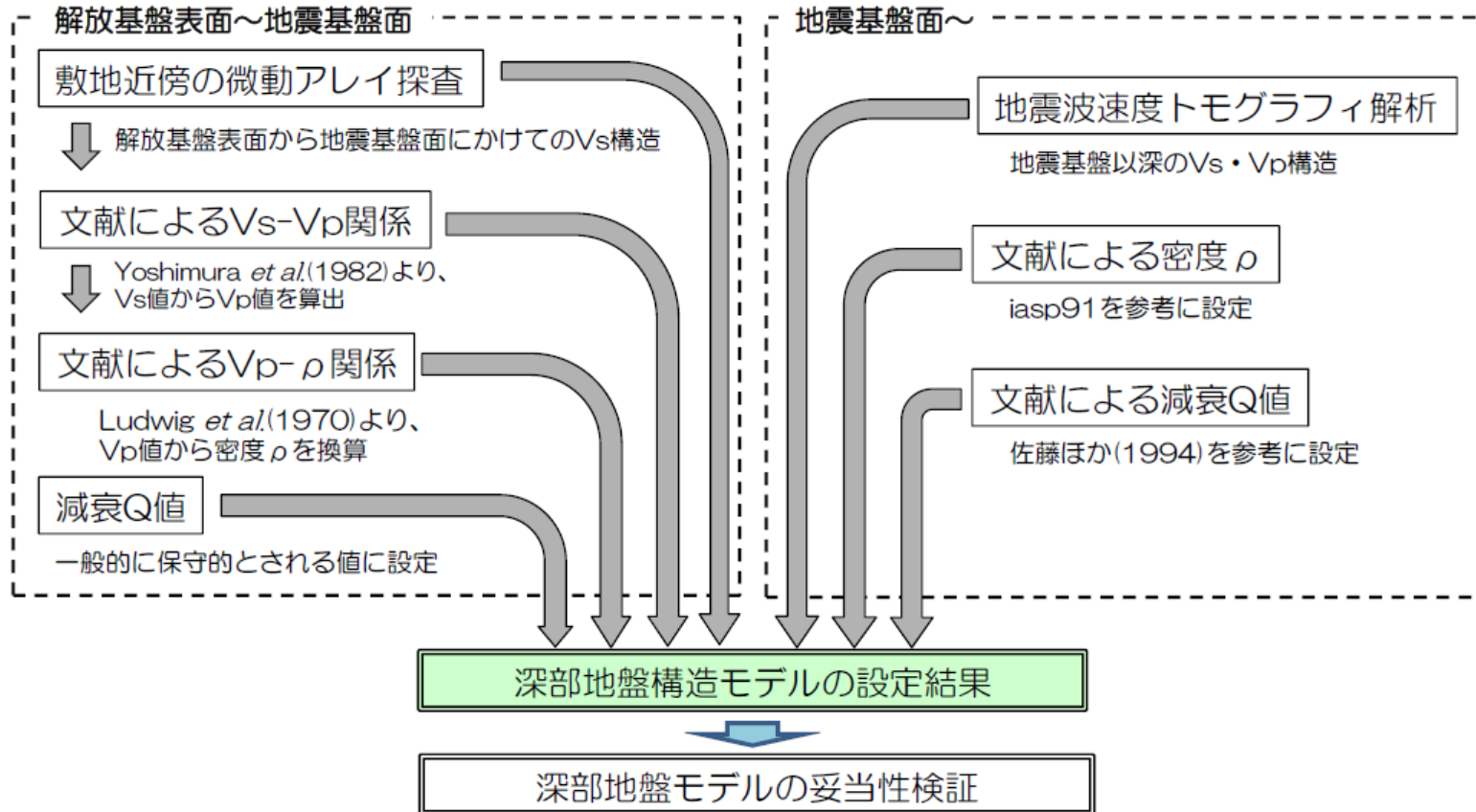
上面 G.L. (m)	層厚 (m)	密度 (g/cm ³)	NS方向				EW方向				UD方向	
			S波速度 (m/s)	減衰定数*		S波速度 (m/s)	減衰定数*		P波速度 (m/s)	減衰定数*		
				h_0	α		h_0	α		h_0	α	
0	1	1.97	202			196			532			
-1	5	1.97	177	0.250	0.438	180	0.469	0.594	470	0.313	0.094	
-6	3	1.92	326			278			1213			
-9	3	1.77	393	0.125	0.859	388	0.172	1.000	1416	0.750	1.000	
-12	1	1.82	466			479			1787			
-13	17	1.82	469			475			1787			
-30	70	1.73	454			469			2008			
-100	110	1.73	518	0.047	0.984	453	0.031	1.000	1690	0.250	0.984	
-210	70	1.75	549			600			1760			
-280	80	1.78	771			704			2219			
-360	∞	1.86	710			710			2040			

※ $h = h_0 \times f^{-\alpha}$ ここで f は周波数(Hz)



深部地盤構造モデルの設定手順

深部地盤構造モデルの設定手順を以下に示す。



2. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

深部地盤構造モデルの設定結果

前節の設定手順に従って設定した深部地盤構造モデルの諸元を以下に示す。

上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)	水平方向		鉛直方向		
			S波速度 (km/s)	減衰定数 [※]	P波速度 (km/s)	減衰定数 [※]	
				Qs		Qp	
0.000	0.360	—	—	—	—	—	浅部地盤構造モデル から設定
-0.360	0.287	1.86	0.710	100	2.040	100	
-0.647	0.327	2.11	1.200		2.610		
-0.974	0.009	2.24	1.500		3.100		
-0.983	0.014	2.42	2.000		3.950		
-0.997	0.013	2.57	2.500	4.800	地震波速度トモグラ フィ解析結果(D)より 設定		
-1.010	3.790	2.66	2.900	5.490			
-4.800	12.640	2.70	3.600	5.960			
-17.440	14.560	2.80	4.170	6.810			
-32.000	∞	3.20	4.320	110 × f ^{0.69}	7.640	110 × f ^{0.69}	

※ fは周波数(Hz)

Yoshimura *et al.*(1982)^{※1}に示されるVs-Vpの関係式より算出

Ludwig *et al.*(1970)^{※2}に示されるVp-ρの関係より換算

iasp91^{※3}を参考に設定

保守的な減衰Q値を設定

佐藤ほか(1994)^{※4}を参考に設定

- ※1 Masayoshi Yoshimura, Seishi Fujii, Kenji Tanaka, and Ken Morita (1982) : On the relationship between P and S-wave velocities in soft rock, SEG Expanded Abstracts 1, 143.
- ※2 Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C.L. Drake (1970) : Seismic Refraction, in "The Sea, Vol.4", edited by A.E. Maxwell, Wiley Interscience, New York, 53-84.
- ※3 Kennett, B. L. N. and E. R. Engdahl (1991) : Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465.
- ※4 佐藤智美, 川瀬博, 佐藤俊明(1994) : 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のポアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, 第462号, pp.79-89.