

大洗研究所(南地区)
高速実験炉原子炉施設(「常陽」)

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価について

令和4年4月25日
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. 検討概要	.....	2
2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価	.....	3
3. 基準地震動	.....	19
4. まとめ	.....	21
5. 参考文献	.....	22
補足資料		
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)	.....	23

1. 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。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施した結果、これまで策定した基準地震動(S_s-D 、 $S_s-1 \sim S_s-5$)を一部の周期帯で上回ることから、標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動 S_s-6 として設定し、補正申請(2021/12/2)を行った。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に当たり、本検討では申請以降の発電炉等の審査動向を踏まえ、以下の内容を反映した評価を行った。
 - 地震基盤相当面を $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層に設定し、 $V_s=2200\text{m/s}$ で定められた標準応答スペクトルに基づき作成した波形を入力
 - 乱數位相の検討に用いる振幅包絡線の経時特性を定めるマグニチュードを保守的にM7.0に設定また、位相の違いによる特異な応答増幅が見られないことを確認するため、敷地の地震観測記録から得られる位相(実位相)を用いて標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成し、地盤応答の影響を確認した。
- 常陽の基準地震動は、同一サイト内にあるHTTRの基準地震動と共通のものを用いている。(第396回核燃料施設等審査会合、2021/3/5)。よって、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価はHTTRと同じである。

- 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 S_s -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。

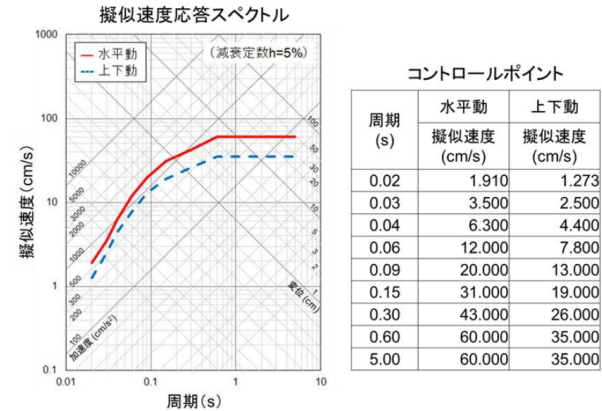
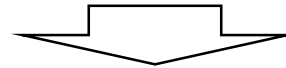
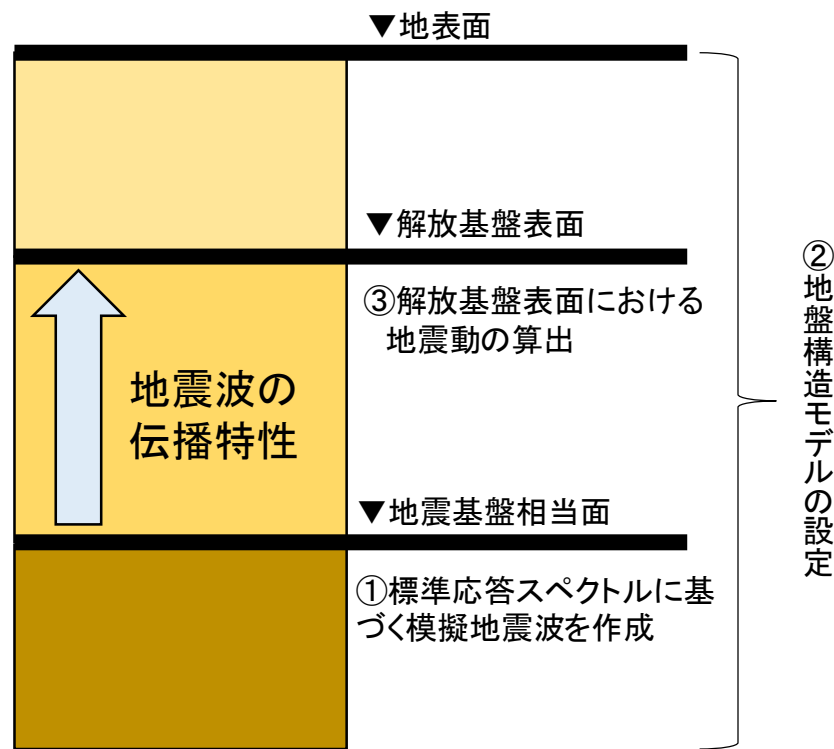
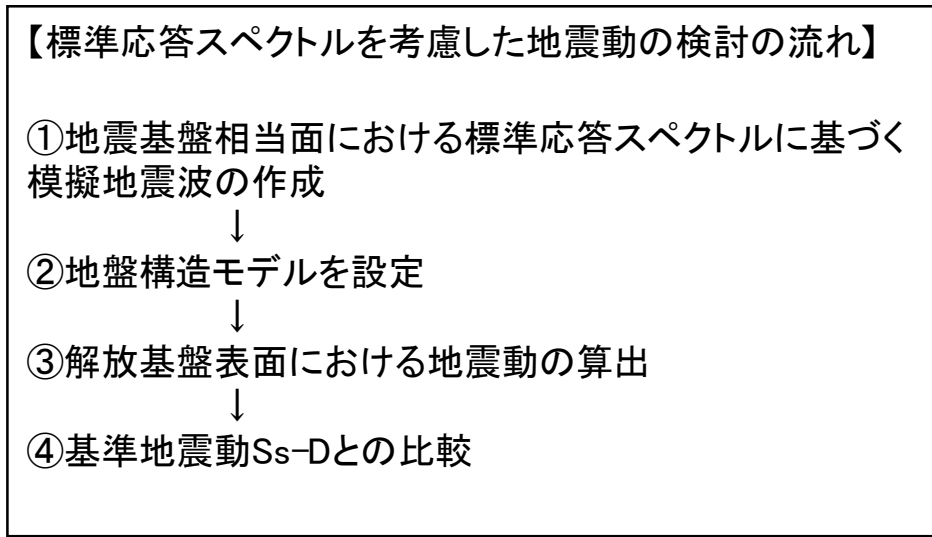


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル
※2021年4月21日原子力規制委員会資料より抜粋



基準地震動 S_s を策定している解放基盤表面のせん断波速度 V_s	検討方針
1,010m/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播特性を考慮した解放基盤表面の応答スペクトルを評価するとともに、評価された応答スペクトルと基準地震動S_s-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のG.L.-1.293km位置($V_s=3,052\text{m/s}$)に設定する。

- 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

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 地盤構造モデルの設定

- 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.-1.293km位置($V_s=3,052\text{m/s}$)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、地盤応答解析により、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。

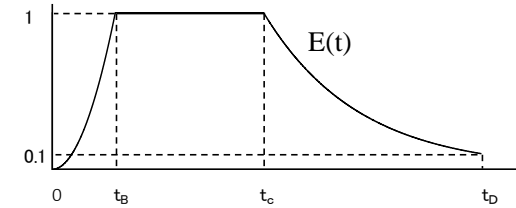
深部地盤構造モデル

	層番号 (No.)	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	
						Qs	hs		Qp	hp
▼解放基盤表面	1	0.000	0.173	—	—	—	—	—	—	—
▼地震基盤相当面	2	-0.173	0.100	1.98	1.010	100	0.005	2.170	100	0.005
	3	-0.273	0.350	2.11	1.186			2.590		
	4	-0.623	0.670	2.44	2.086			4.100		
	5	-1.293	2.708	2.68	3.052	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$	5.750	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$
6	-4.000	11.900	2.70	3.600	5.960					
7	-15.900	14.600	2.80	4.170	6.810					
8	-30.500	∞	3.20	4.320	7.640					

- 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	29.8	3.7	16.3	29.8
鉛直成分	400	29.8	3.7	16.3	29.8

マグニチュード:M=7.0、等価震源距離:X_{eq}=10km

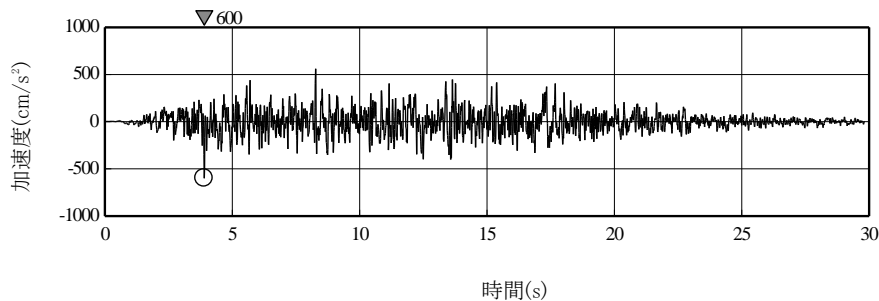


$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

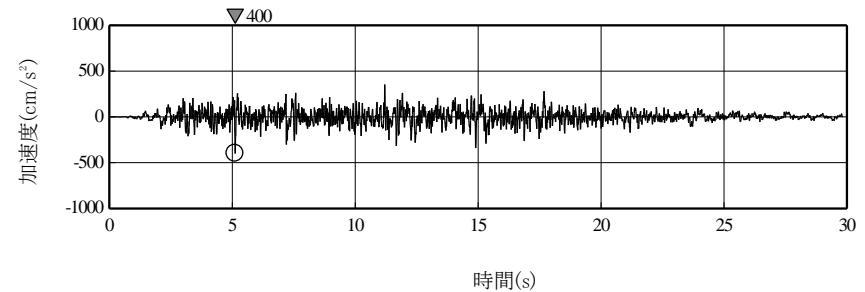
$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

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

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



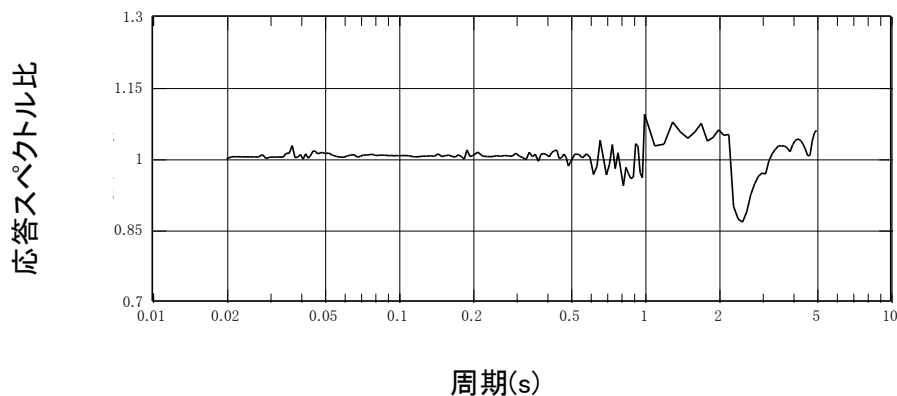
水平成分



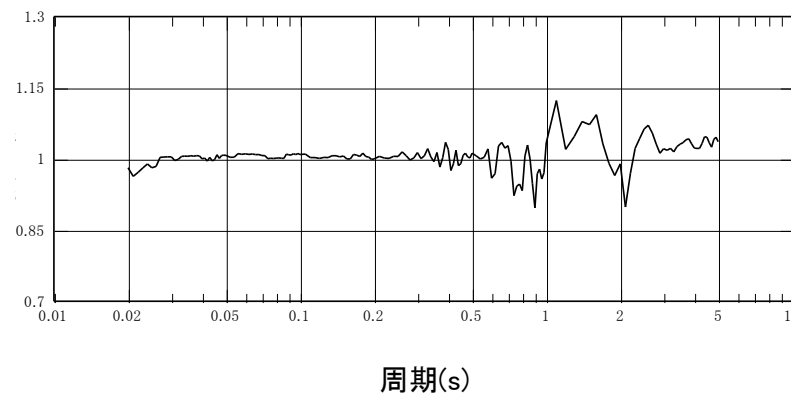
鉛直成分

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

- 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)※

※模擬地震波(最大値400cm/s²)に対して、応答スペクトルの周期0.02秒の加速度はやや小さく392.5cm/s²、応答スペクトル比は0.9815であり、適合条件である0.85以上を満足してフィッティングが終了している。

応答スペクトル強さの比(SI比)

模擬地震波	SI比
水平成分	1.02
鉛直成分	1.01

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

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

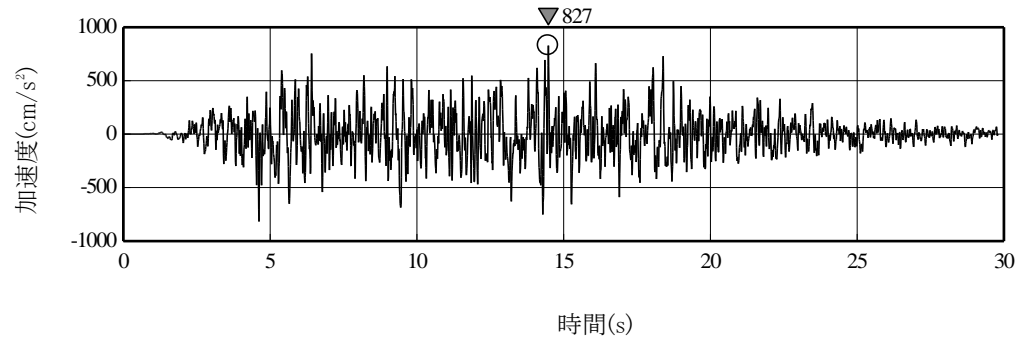
$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_{v1}(T) dT}{\int_{0.1}^{2.5} S_{v2}(T) dT} \geq 1.0$$

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

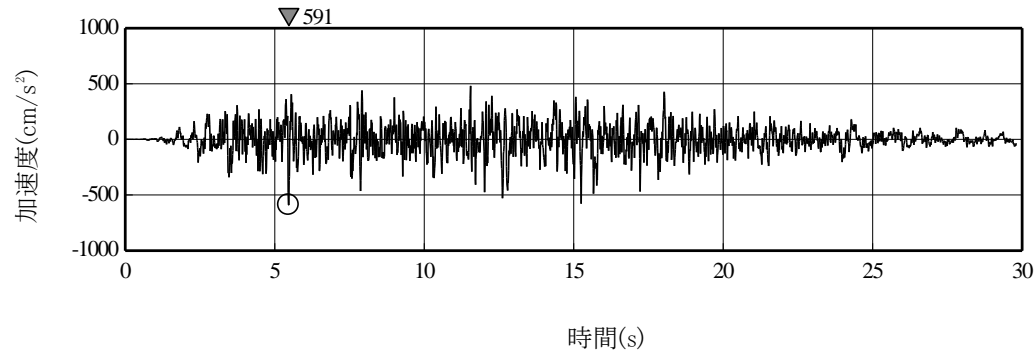
作成した模擬地震波は、日本電気協会(2015)²⁾に示される適合度の条件を満足していることを確認した。

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 解放基盤表面における地震動の算出

- 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。



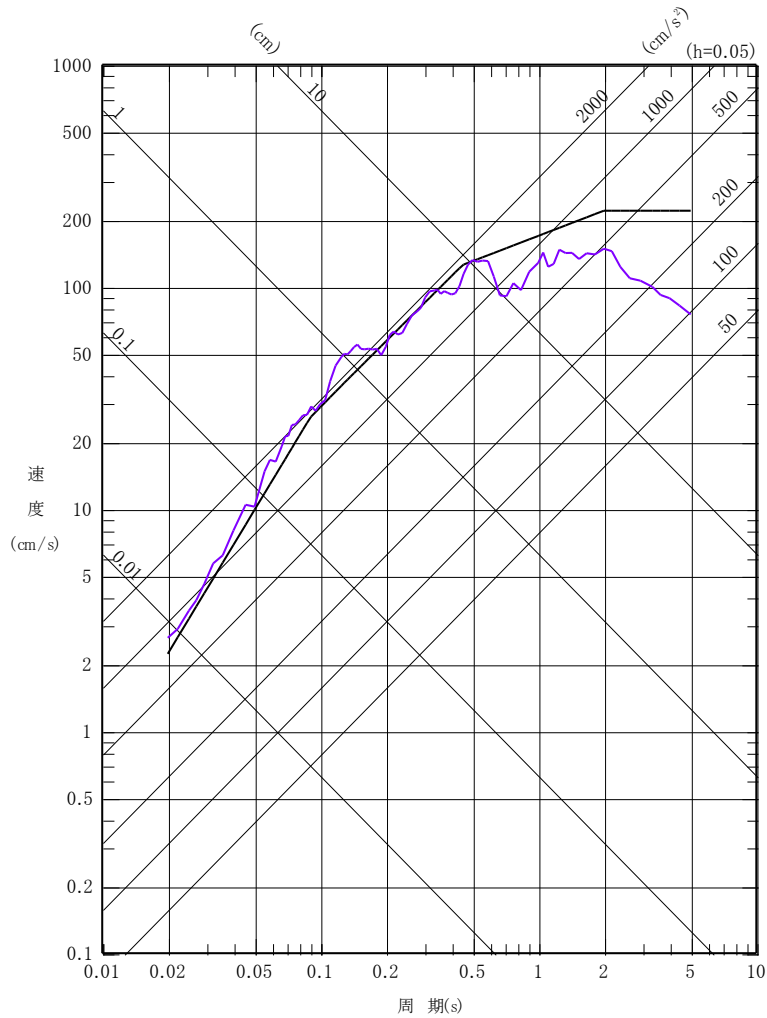
水平成分



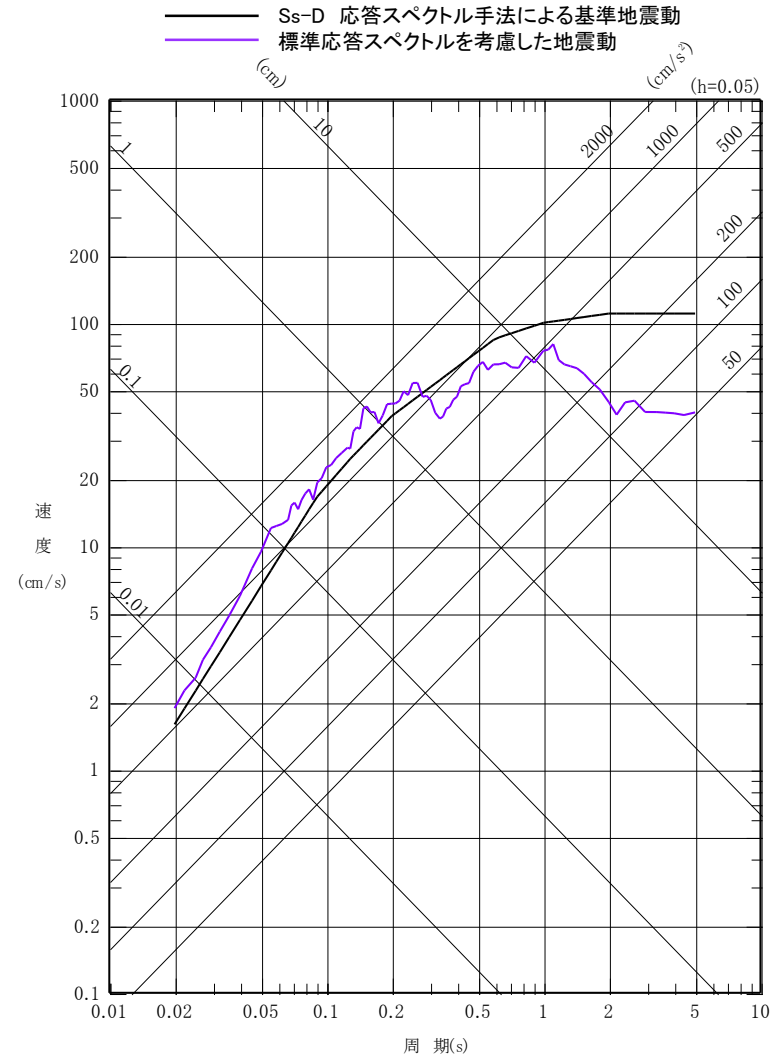
鉛直成分

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は、水平及び鉛直ともに一部の周期帯で、基準地震動 S_s -Dを上回る結果となった。



水平成分



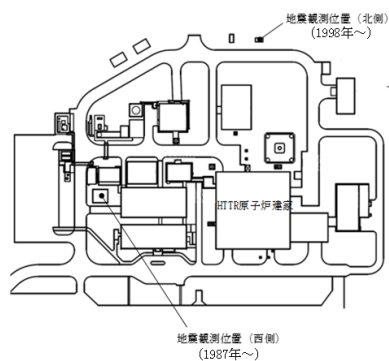
鉛直成分

【検討目的】

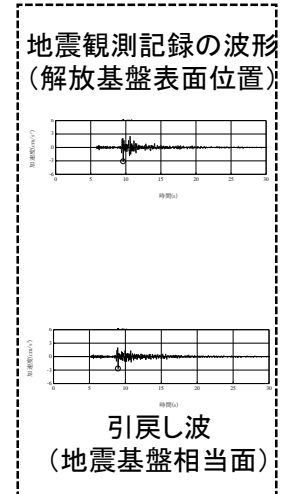
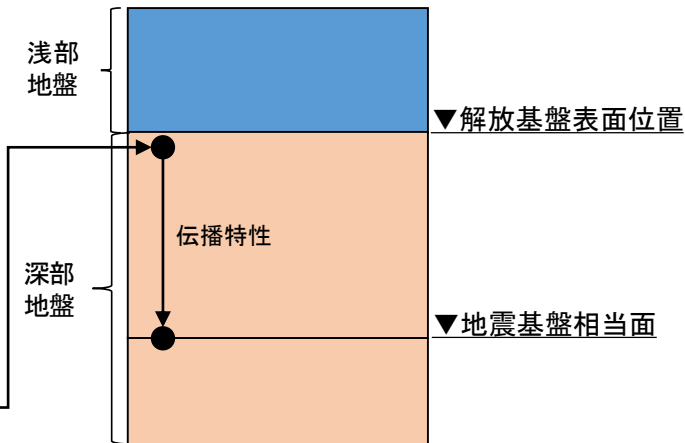
- 地震基盤相当面から解放基盤表面において、地震波の伝播特性にはばらつきや差異があることが否定できないため、前段の「乱数位相による検討」※1に加え「実位相による検討」※2を実施し、位相の違いにより特異な地盤の応答増幅がないか確認を行う。

【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。
- 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、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動(地盤応答解析結果)の位相特性を用いる。



G.L.	地震観測位置		
	西側	北側	
0m			地表面
-1m	○		
-30m	○		
-32m	○	○	
-95m	○		
-172.5m			解放基盤表面
-174m	○		
-250m		○	



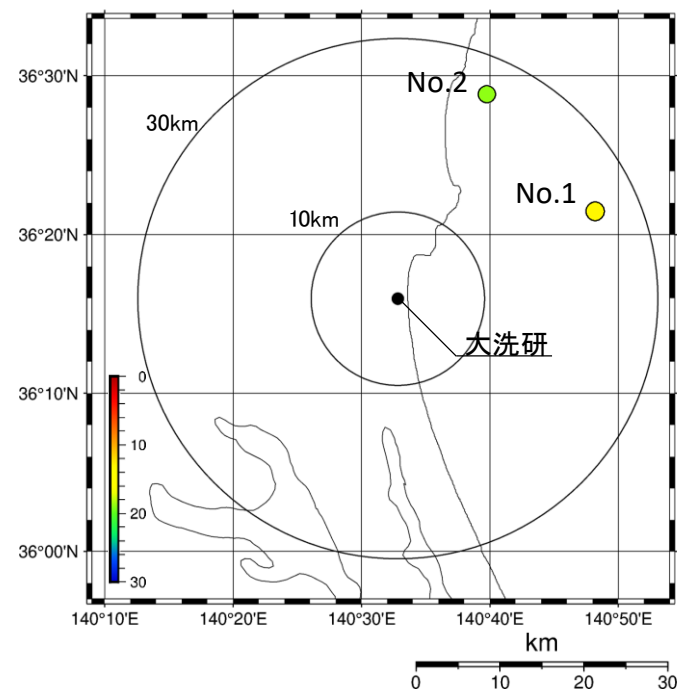
大洗研HTTR 地震観測位置

解放基盤表面位置から地震基盤相当面までの
引戻しのイメージ

※1:「乱数位相による検討」: 乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせにより模擬地震波を作成し地震動評価。

※2:「実位相による検討」: 敷地の観測記録から地震基盤相当面における地震動を求め、その位相特性を用いて模擬地震波を作成し地震動評価。

- 標準応答スペクトルは、全国共通に考慮すべき地震(Mw6.5程度未満)として、震源近傍の内陸地殻内地震の観測記録(震央距離30km、深さ0~20km、Mw5.0~6.6)を収集して策定されている。
- 大洗研周辺ではMw5.0~6.6の内陸地殻内地震は観測されていないが、実位相による検討においては敷地地盤の振動特性に起因する特徴を適切に反映させることが必要と考え、内陸地殻内地震のうち、敷地に最も近い位置で発生した地震(2011年8月22日(M4.3,震源距離28km))の観測記録を用い、この地震観測記録の位相特性を模擬地震波に反映させる。



震央分布図

大洗研で観測された地震観測記録

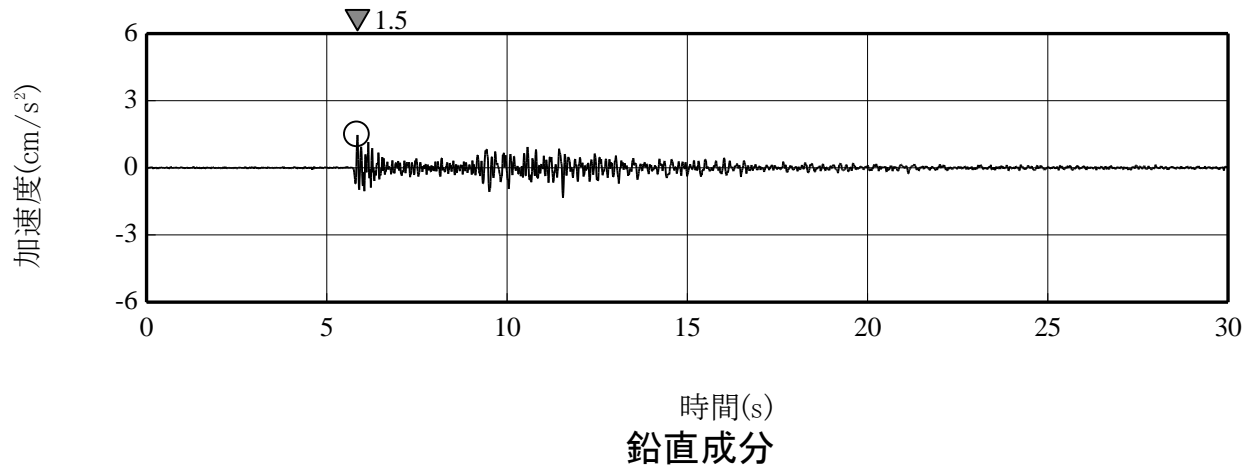
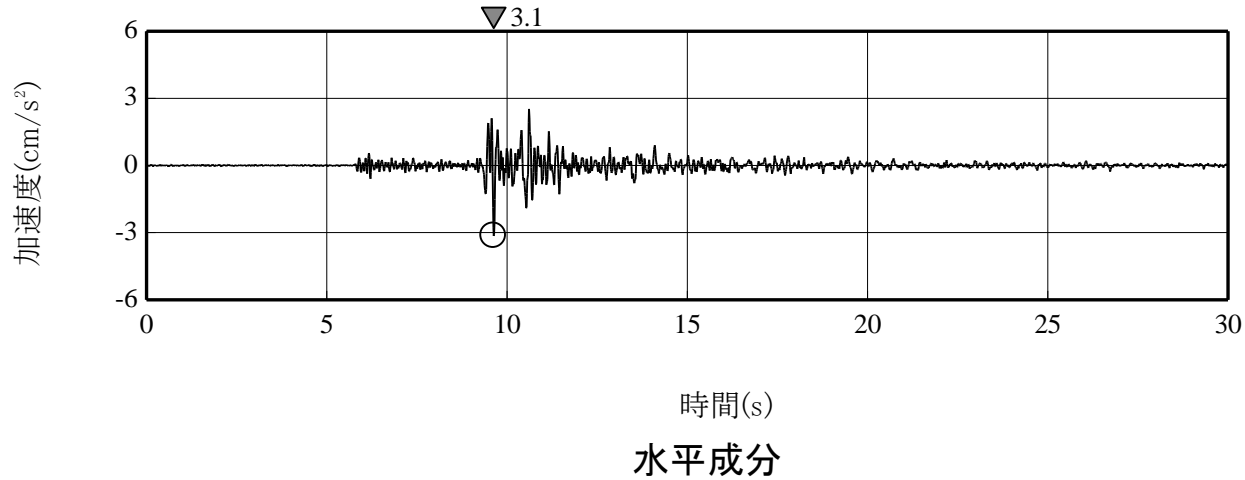
大洗研から震央距離約30 kmの範囲にある深さ0~20kmの地震観測記録

No.	年月日	震央位置		地震規模 M	深さ (km)	震央距離 (km)	震源距離 (km)	地震発生様式
		北緯	東経					
1	2011/8/22	36°21.3'N	140°48.3'E	4.3	13	25	28	内陸地殻内地震
2	2020/9/10	36°28.7'N	140°39.8'E	4.1	19	26	32	"

検討に用いた地震

2. 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(解放基盤表面位置における地震観測記録)

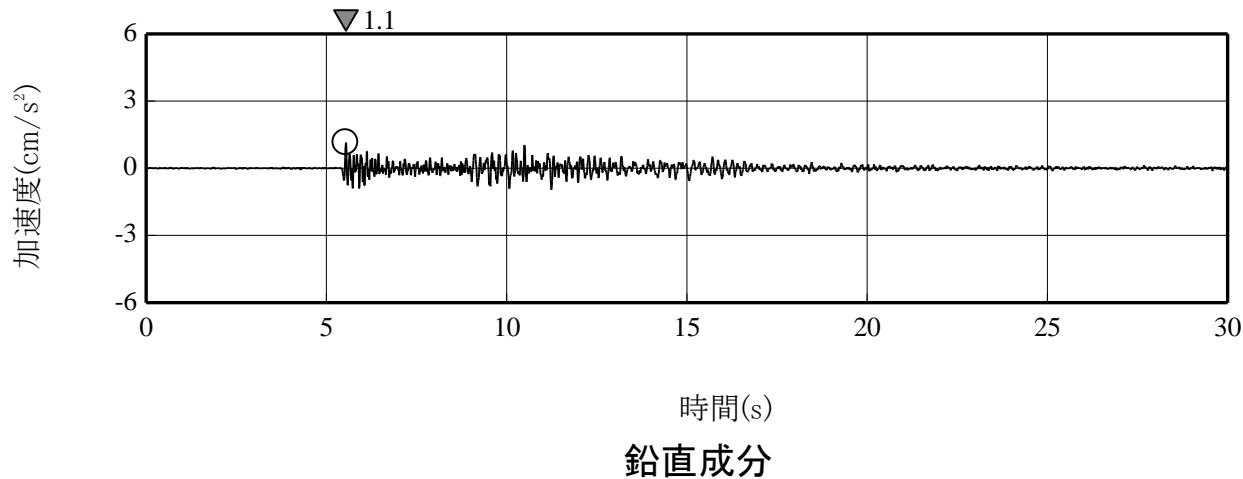
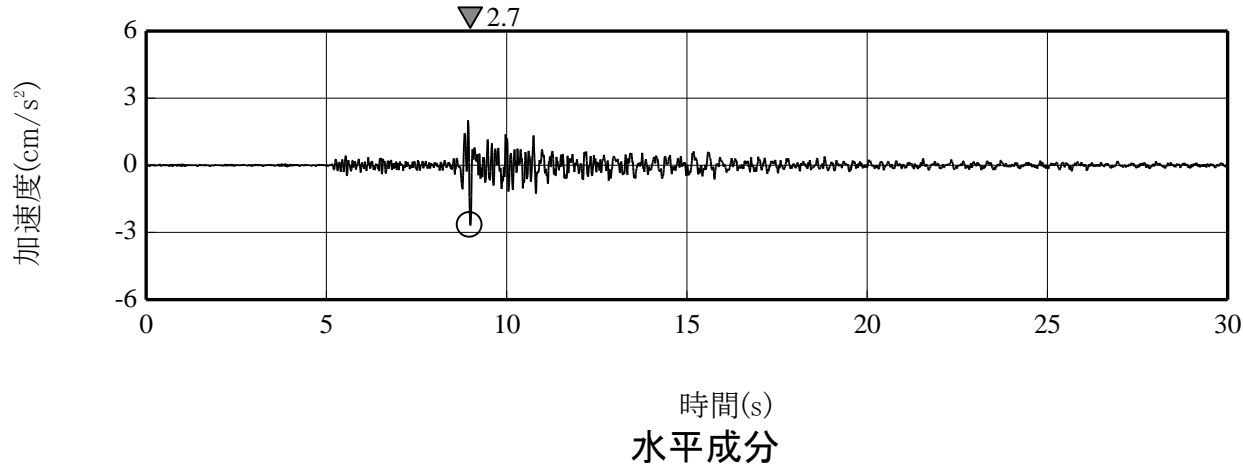
- 解放基盤表面位置における地震観測記録の加速度波形を以下に示す。



解放基盤表面位置における地震観測記録 (2011年8月22日 (M4.3))
加速度波形

2. 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動)

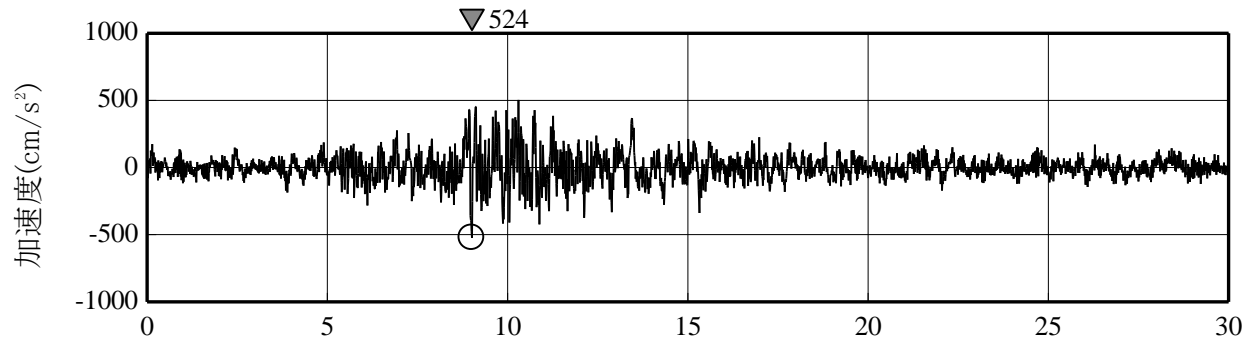
- 浅部+深部地盤構造モデルを用いて、解放基盤表面位置の地震観測記録を地震基盤相当面(G.L.-1.293km)に引戻し、地震基盤相当面における地震動を算出した。
- 地震基盤相当面における地震動の加速度波形を以下に示す。



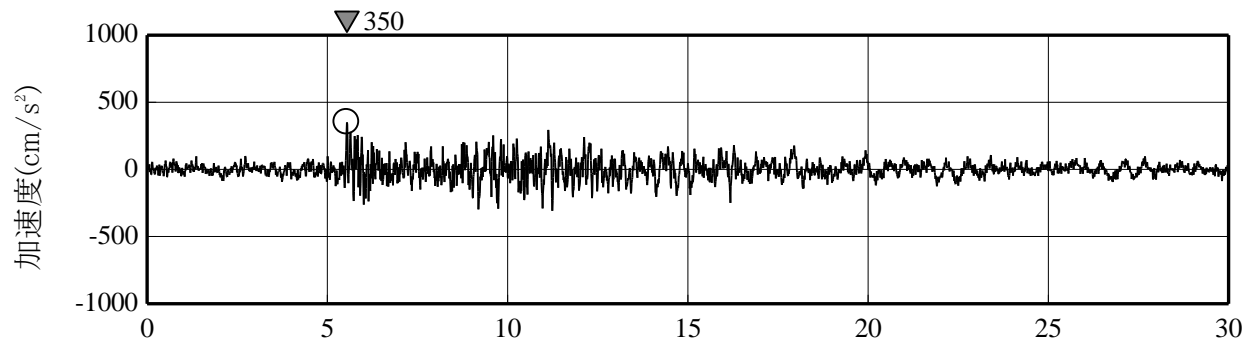
地震基盤相当面における地震動(2011年8月22日(M4.3))
加速度波形

2. 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動(2011年8月22日(M4.3))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。



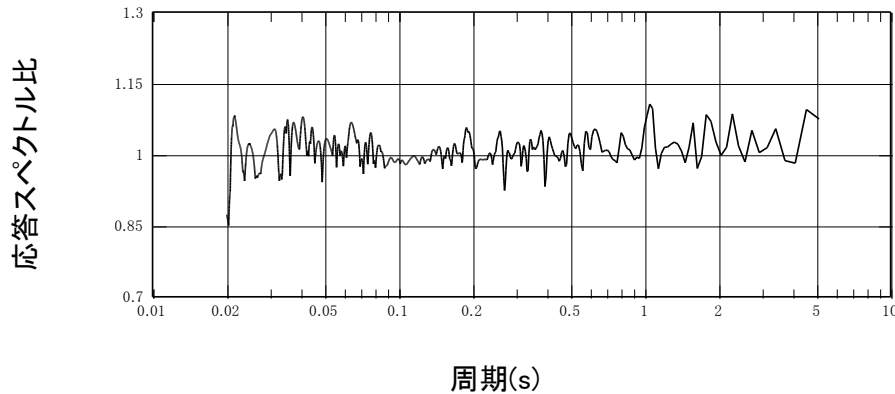
時間(s)
水平成分



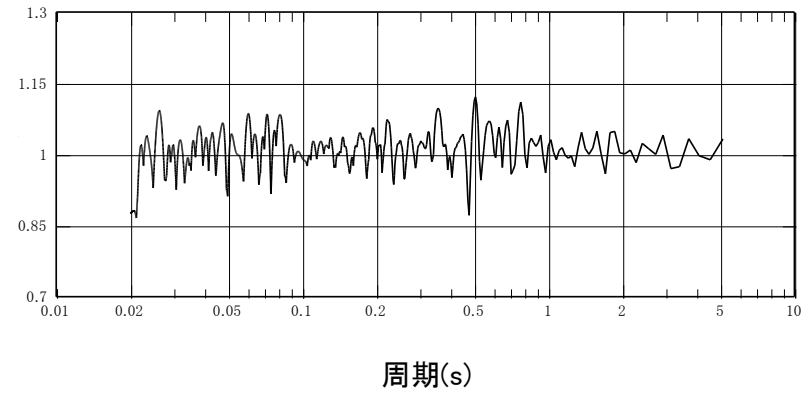
時間(s)
鉛直成分

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(実位相による検討)
加速度波形

- 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	1.02
鉛直成分	1.01

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

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

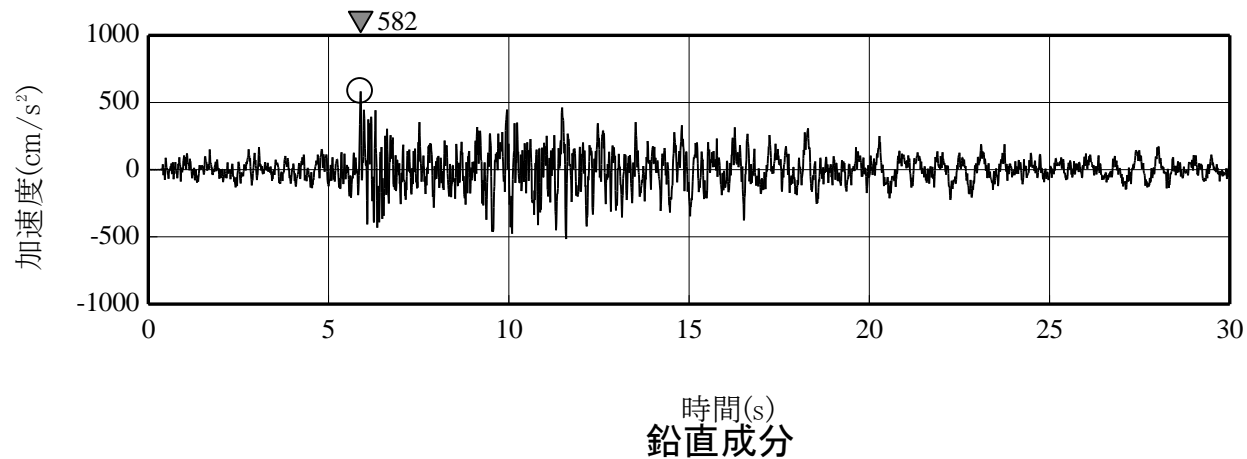
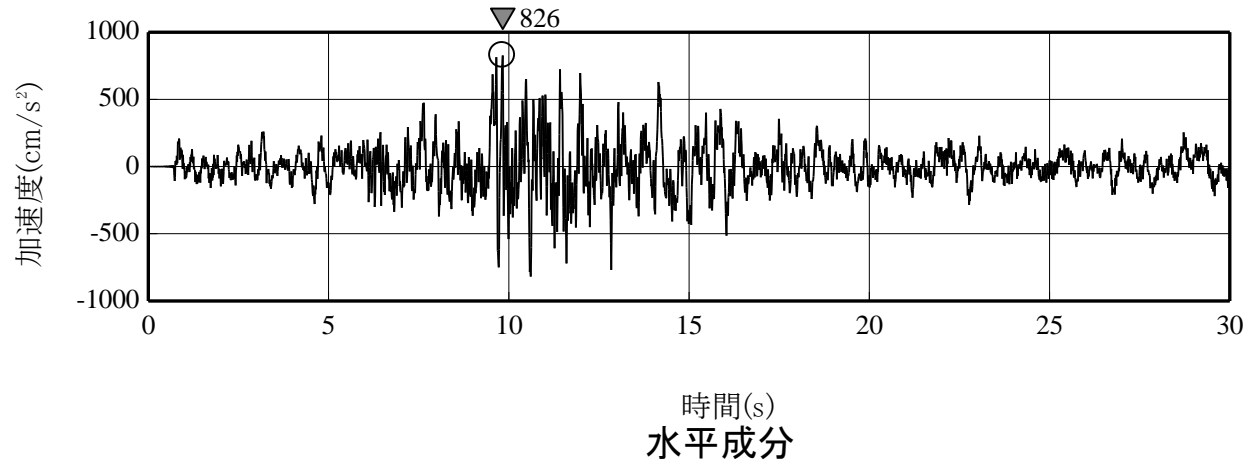
$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_{v1}(T) dT}{\int_{0.1}^{2.5} S_{v2}(T) dT} \geq 1.0$$

ただし、
 SI : 応答スペクトル強さ
 $S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値(cm/s)
 $S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値(cm/s)
 T : 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。

2. 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(解放基盤表面における地震動)

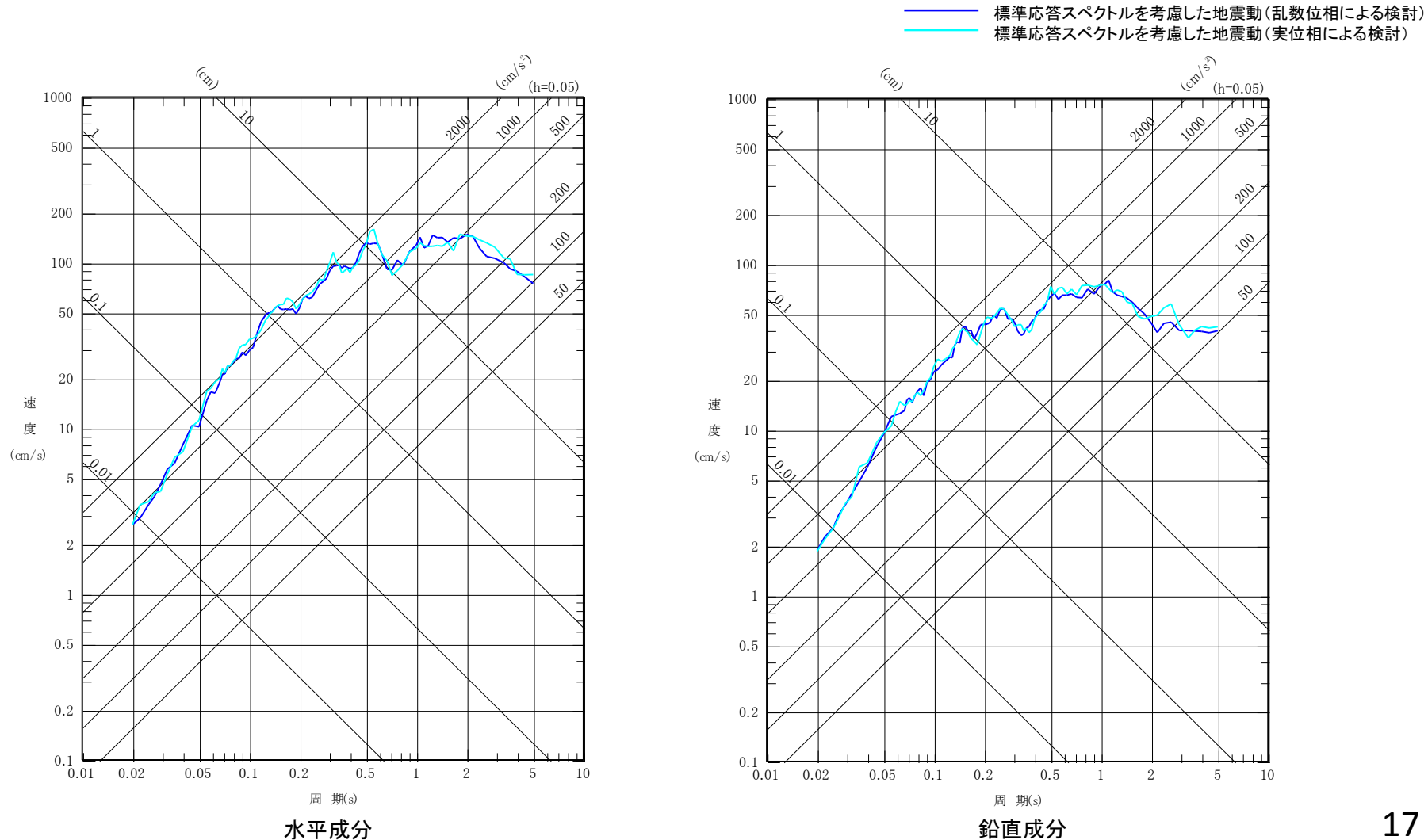
- 「乱数位相による検討」と同様に地盤応答解析を行い、解放基盤表面における地震動を評価した。
- 解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動(実位相による検討)の加速度波形を以下に示す。



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

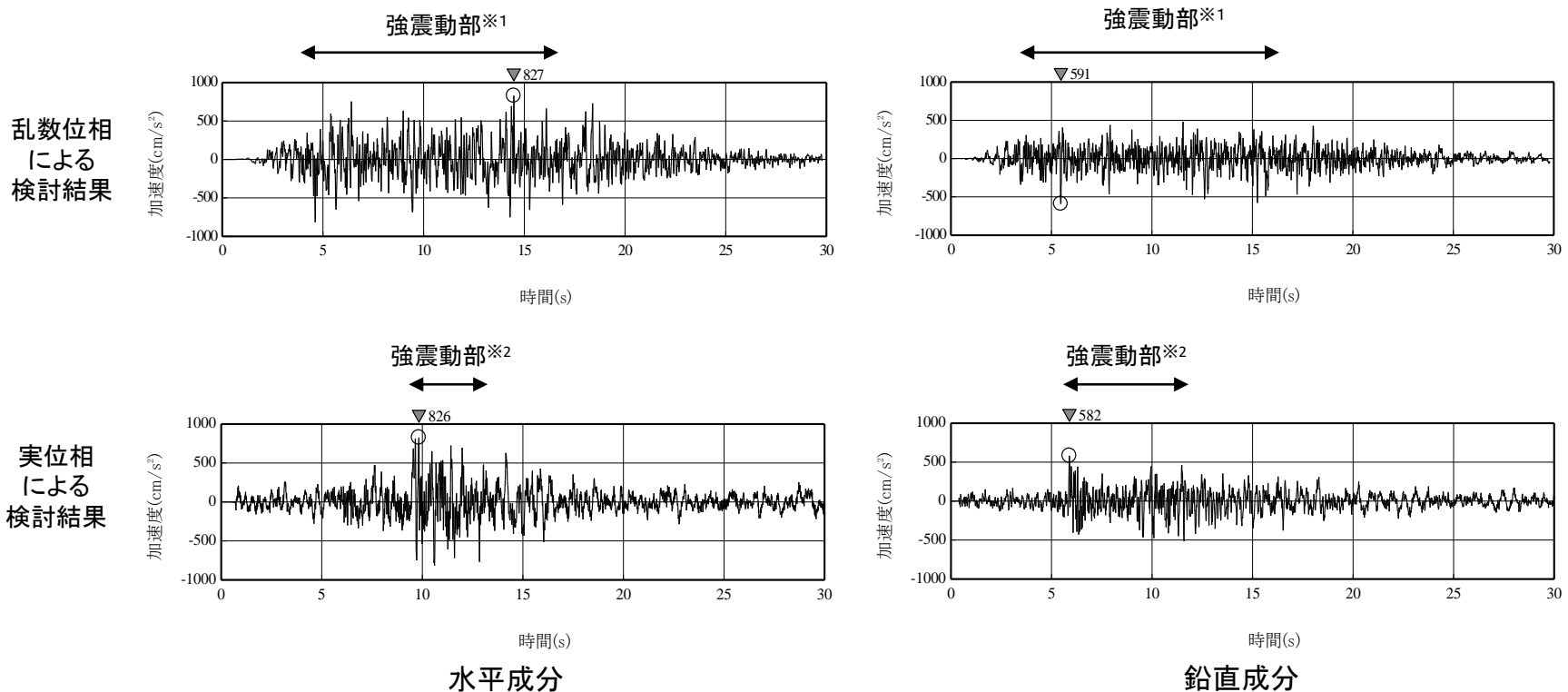
2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 乱数位相と実位相による検討結果の比較(応答スペクトル)

- 「乱数位相による検討」と「実位相による検討」の応答スペクトルを以下に示す。
- 両者の結果は概ね同程度となっており、位相の違いによる特異な地盤の応答増幅の影響は見られないことを確認した。



2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 乱数位相と実位相による検討結果の比較(加速度波形)

- ・地盤及び建物等の水平及び鉛直の組合せ評価を行う上では、水平成分と鉛直成分で強震動部の時間が重複し、かつ継続時間が長い方が安全側の評価となり、また、非線形解析を行う場合に対しても、強震動部の継続時間が長い方が安全側の評価となると考える。
- ・「乱数位相」による検討結果は、「実位相」による検討結果に比べて、水平成分と鉛直成分で強震動部の時間が重複し、かつ継続時間が長くなっており、標準応答スペクトルを考慮した地震動として「乱数位相」による検討結果を用いることは妥当と判断した。



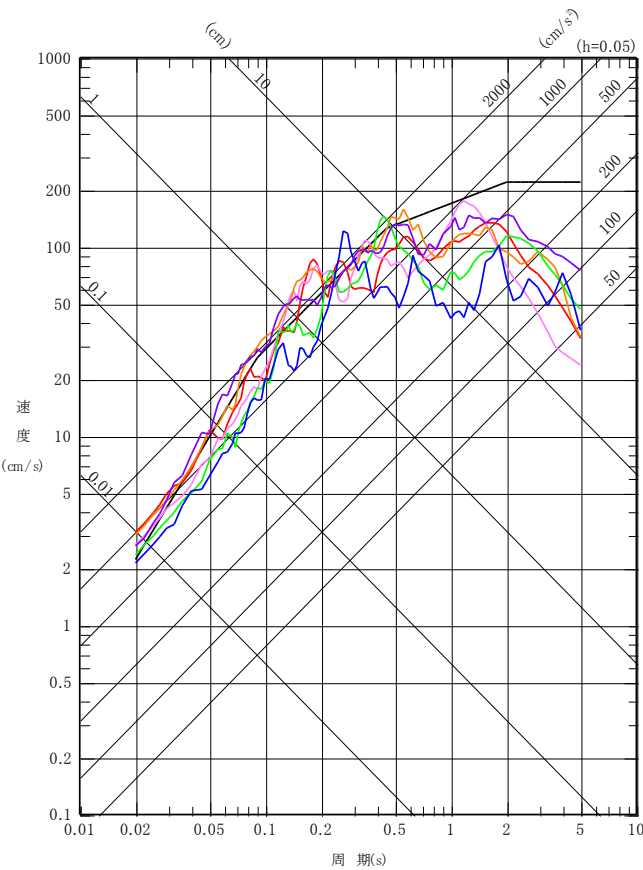
解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動の加速度波形

※1: 振幅包絡線(p.6)に示す強震動が継続する t_B 秒~ t_C 秒間(約13秒)
 ※2: 最大加速度と同程度の加速度が継続する時間

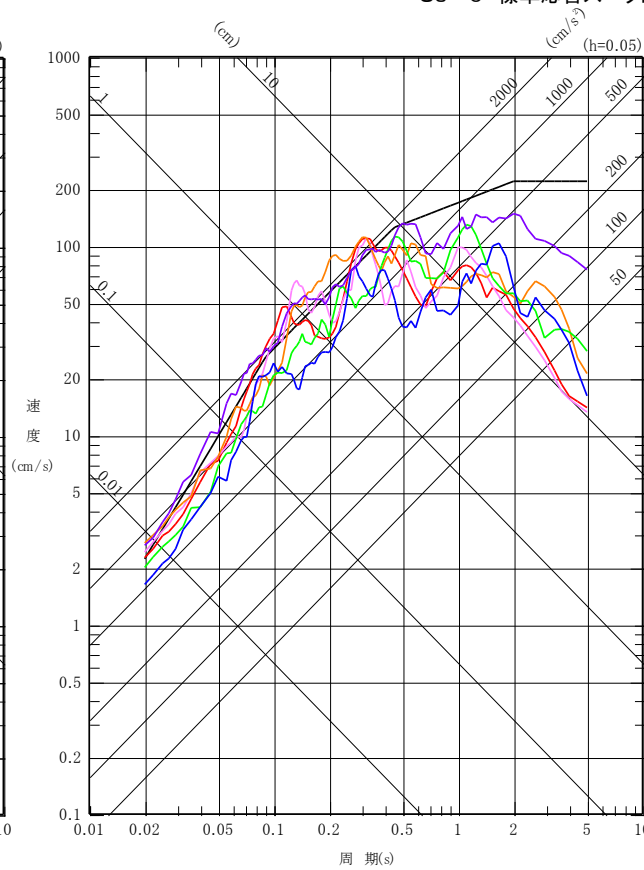
3. 基準地震動 基準地震動S_sの応答スペクトル

- 基準地震動S_sの応答スペクトルを示す。標準応答スペクトルを考慮した地震動は、水平及び鉛直ともに基準地震動S_s-D、S_s-1～S_s-5を一部の周期帯で上回ることから、標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動S_s-6として選定した。

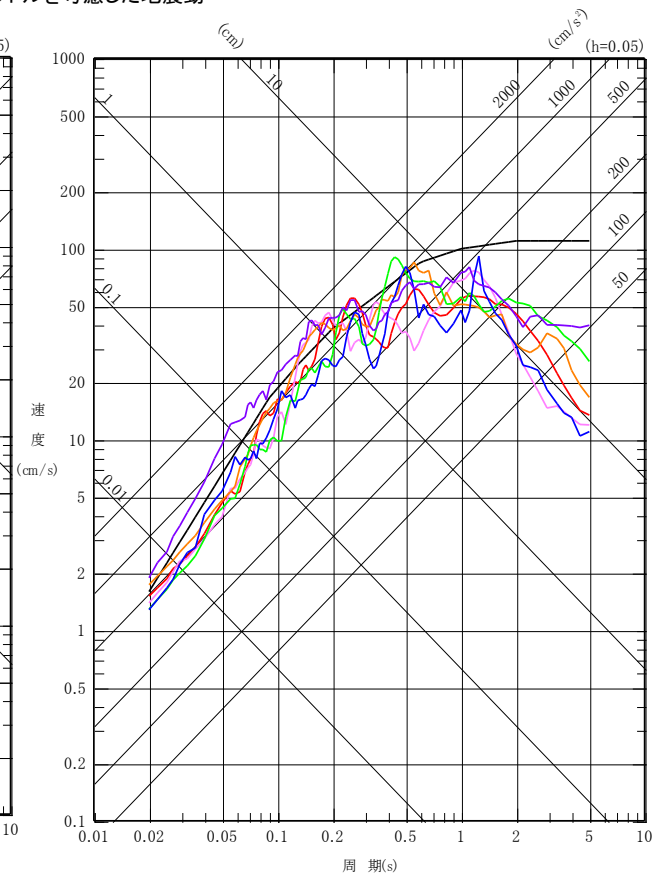
- S_s-D 応答スペクトル手法による基準地震動
- S_s-1 F3断層～F4断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- S_s-2 F3断層～F4断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-3 F3断層～F4断層による地震(短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-4 F3断層～F4断層による地震(断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-5 2011年東北地方太平洋沖型地震(SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S_s-6 標準応答スペクトルを考慮した地震動



NS成分



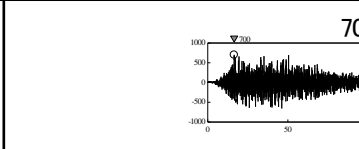
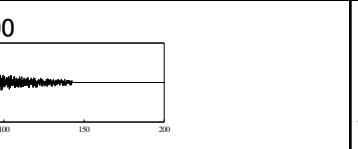
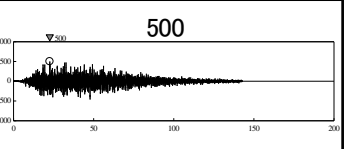
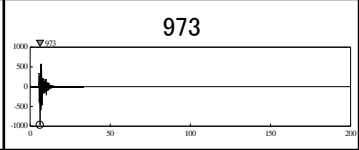
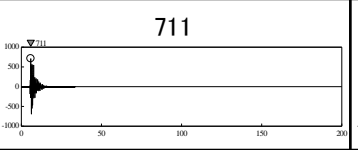
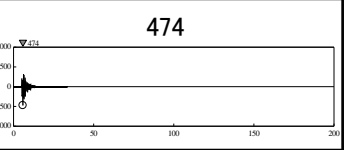
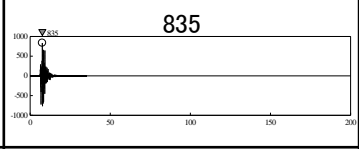
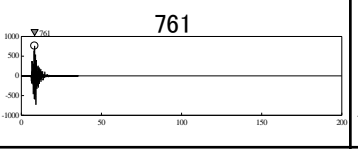
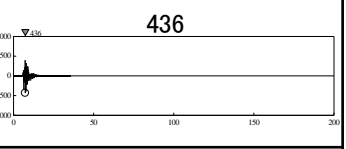
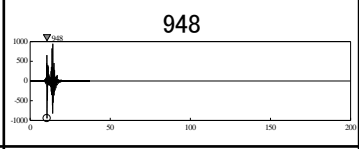
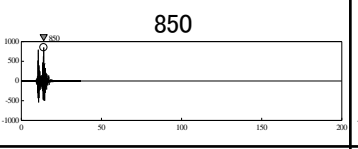
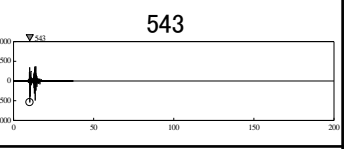
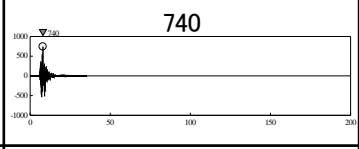
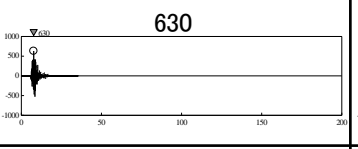
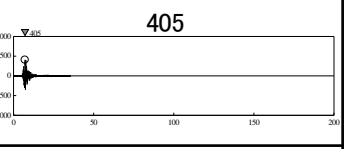
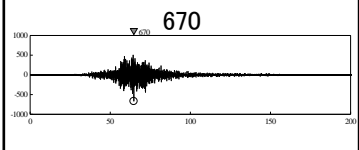
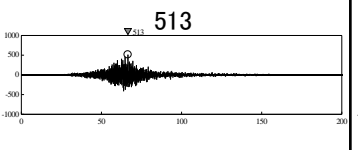
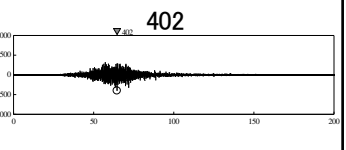
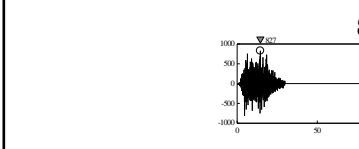
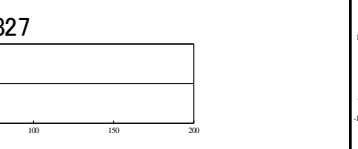
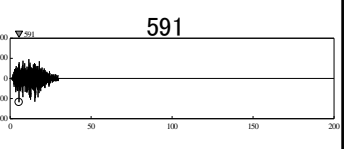
EW成分



UD成分

3. 基準地震動 基準地震動Ssの最大加速度値

- 基準地震動Ss^{*}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
Ss-D	応答スペクトル手法による基準地震動			
Ss-1	F3断層～F4断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)			
Ss-2	F3断層～F4断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)			
Ss-3	F3断層～F4断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)			
Ss-4	F3断層～F4断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点3)			
Ss-5	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)			
Ss-6	標準応答スペクトルを考慮した地震動			

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

- 大洗研において、新たに規定された標準応答スペクトルを考慮した地震動を作成した。
 - ・標準応答スペクトルはせん断波速度 $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面にて定義されており、大洗研の地震基盤相当面は、地盤構造モデルのG.L.-1.293km($V_s=3,052\text{m/s}$)に設定した。
 - ・振幅包絡線の経時特性を定めるマグニチュードを保守的にM7.0に設定した。
 - ・地震基盤相当面から解放基盤表面までの地震波の伝播特性を、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に反映させた。

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動として、「乱數位相」と「実位相」を用いた模擬地震動を作成して比較を行い、以下のとおり、「乱數位相」を用いた模擬地震動を用いることの妥当性を確認した。
 - ・応答スペクトルを比較した結果、位相の違いによる特異な応答増幅が見られないことを確認した。
 - ・加速度波形を比較した結果、「乱數位相」の方が「実位相」に比べて、水平成分と鉛直成分で強震動部の時間が重複し、かつ継続時間が長くなっていることから、地盤及び建物等の水平及び鉛直の組合せ評価や、非線形解析を行う評価に対して安全側の評価になると考えられるため、「乱數位相」による検討結果を用いることは妥当と判断した。

- 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は、これまでに策定した基準地震動 S_s-D 、 $S_s-1\sim S_s-5$ を一部の周期帯で上回ることから、標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動 S_s-6 として選定した。

- 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. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

1. 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
 - 1.1 常陽の基準地震動 S_s 策定の概要
 - 1.2 常陽地点における地震動特性の分析
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

- 参考1 震源を特定せず策定する地震動(M_w 6.5以上の地震に関する検討)
- 参考2 「日本海溝沿いの地震活動の長期評価」に対する確認結果について
- 参考3 F3断層～F4断層におけるHTTR地点と常陽地点の等価震源距離の比較

参考文献

1. 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

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次元的な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まる観測位相速度と、広域にわたる物理探査等から求ま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次元的な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

1. 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

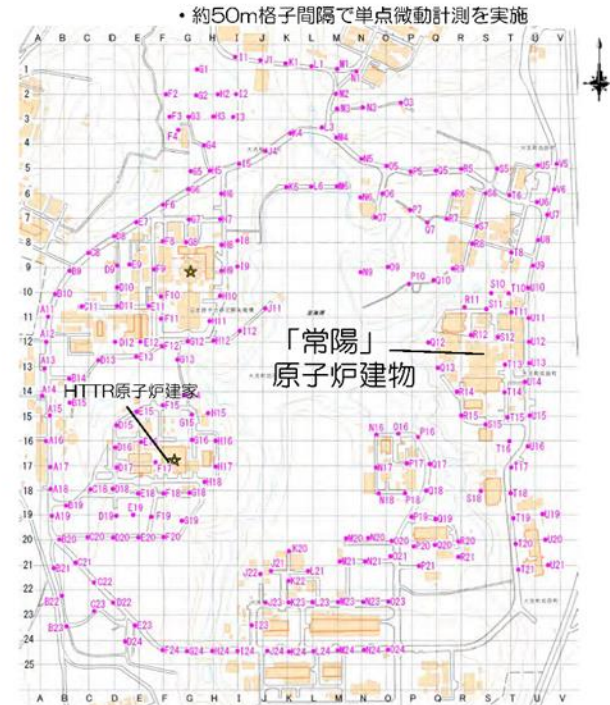
【検討の目的】

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

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



大洗研の測定位置図



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/5S	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

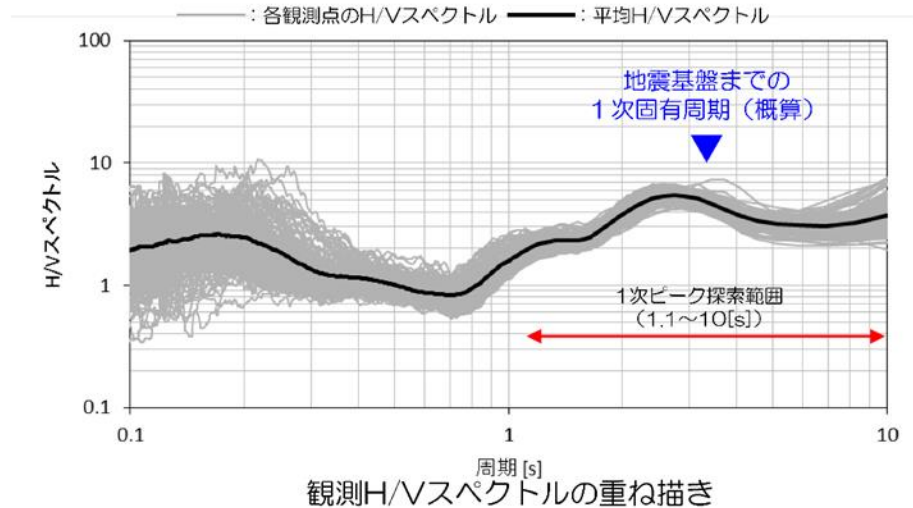
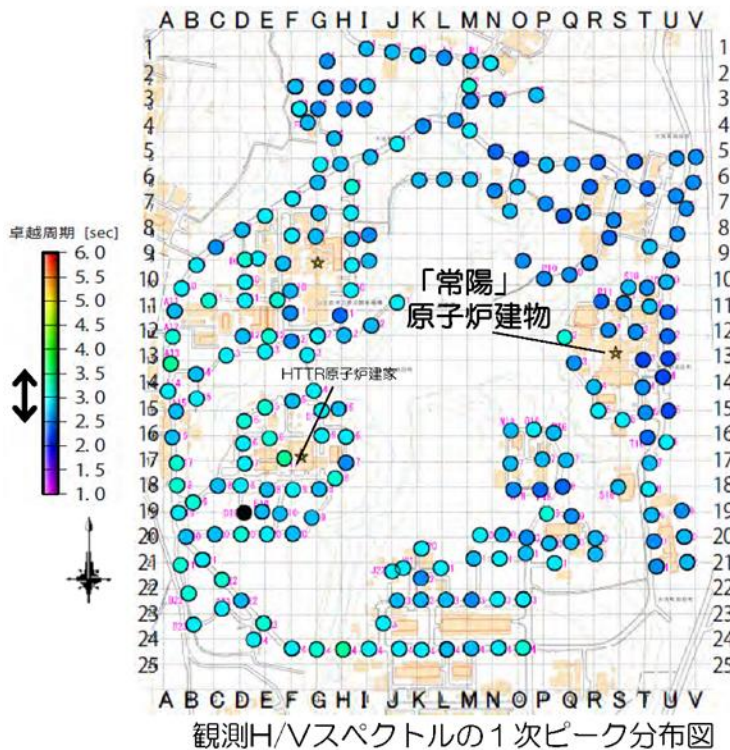
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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。



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3.3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。

1. 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

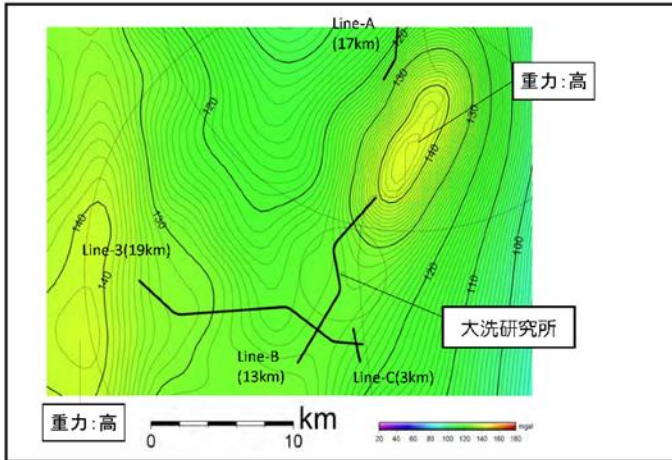
(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

■ 地震探査側線の配置

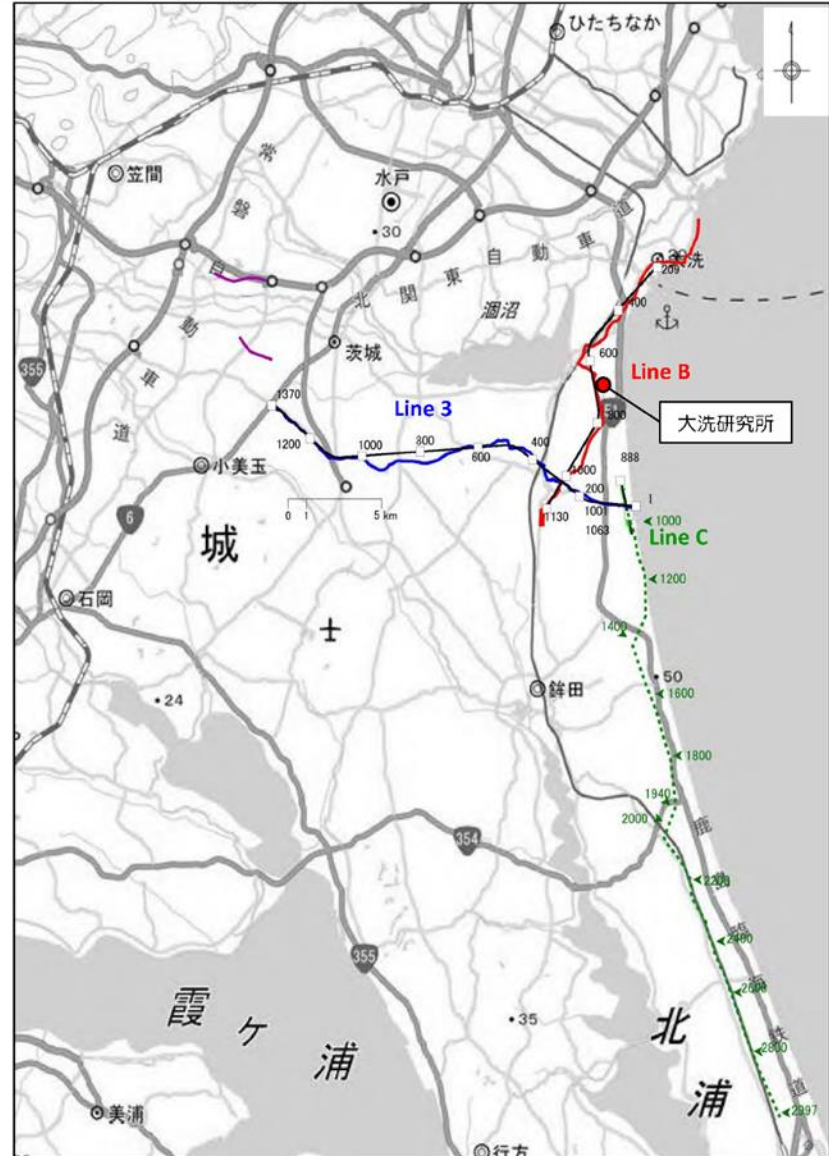
地震探査の配置を右図に示す。
東西方向をLine-3、南北方向をLine-B、Cとする。



※ Line-1,2,Aについては東海地区における探査測線を示す。



重力異常図と反射法・屈折法探査測線の関係



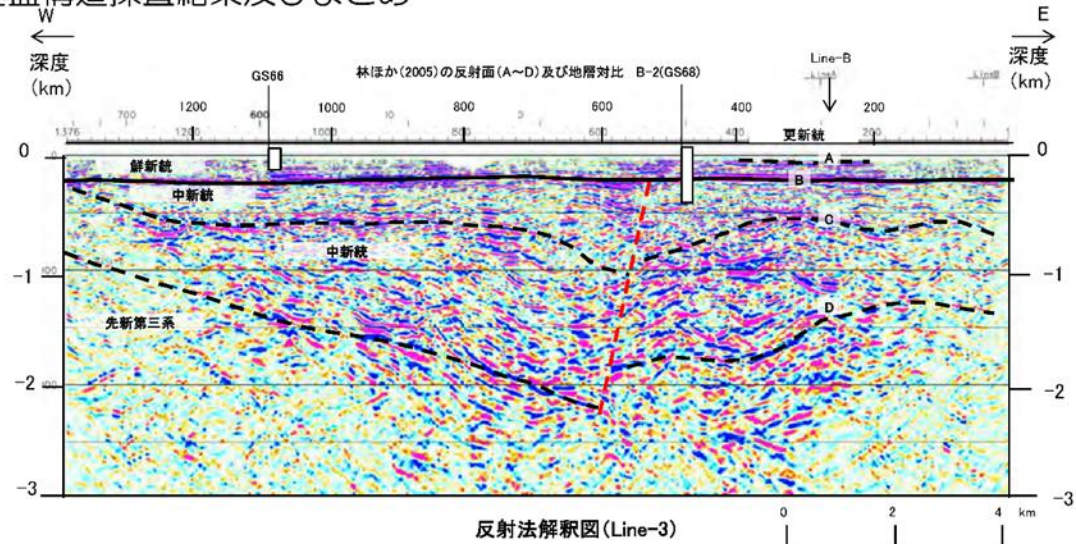
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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

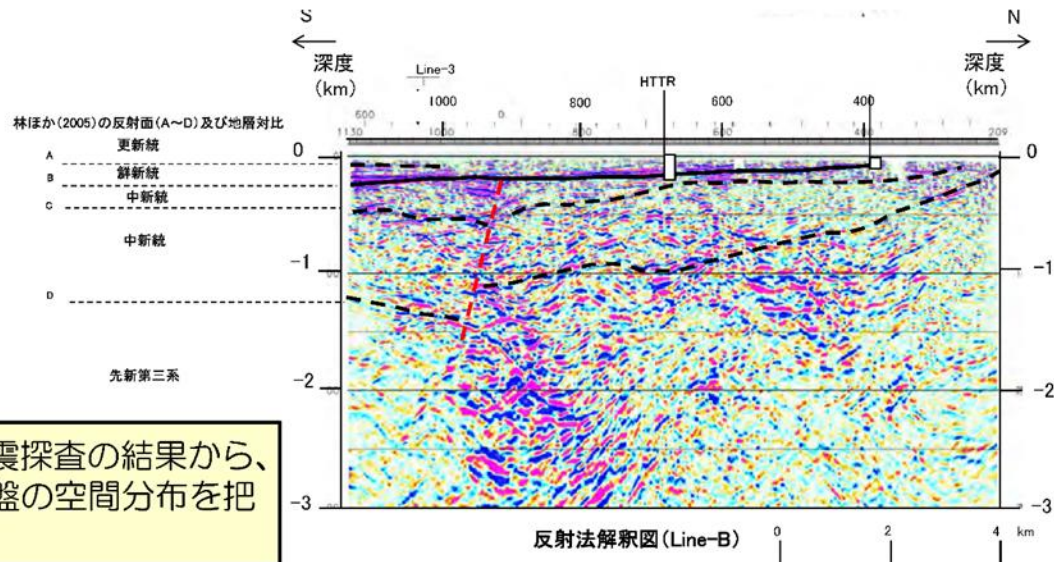
(2) 反射法・屈折法地震探査による検討

■ 地震探査結果に基づく基盤構造探査結果及びまとめ

Line-3 (東西)



Line-B (南北)



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。

1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

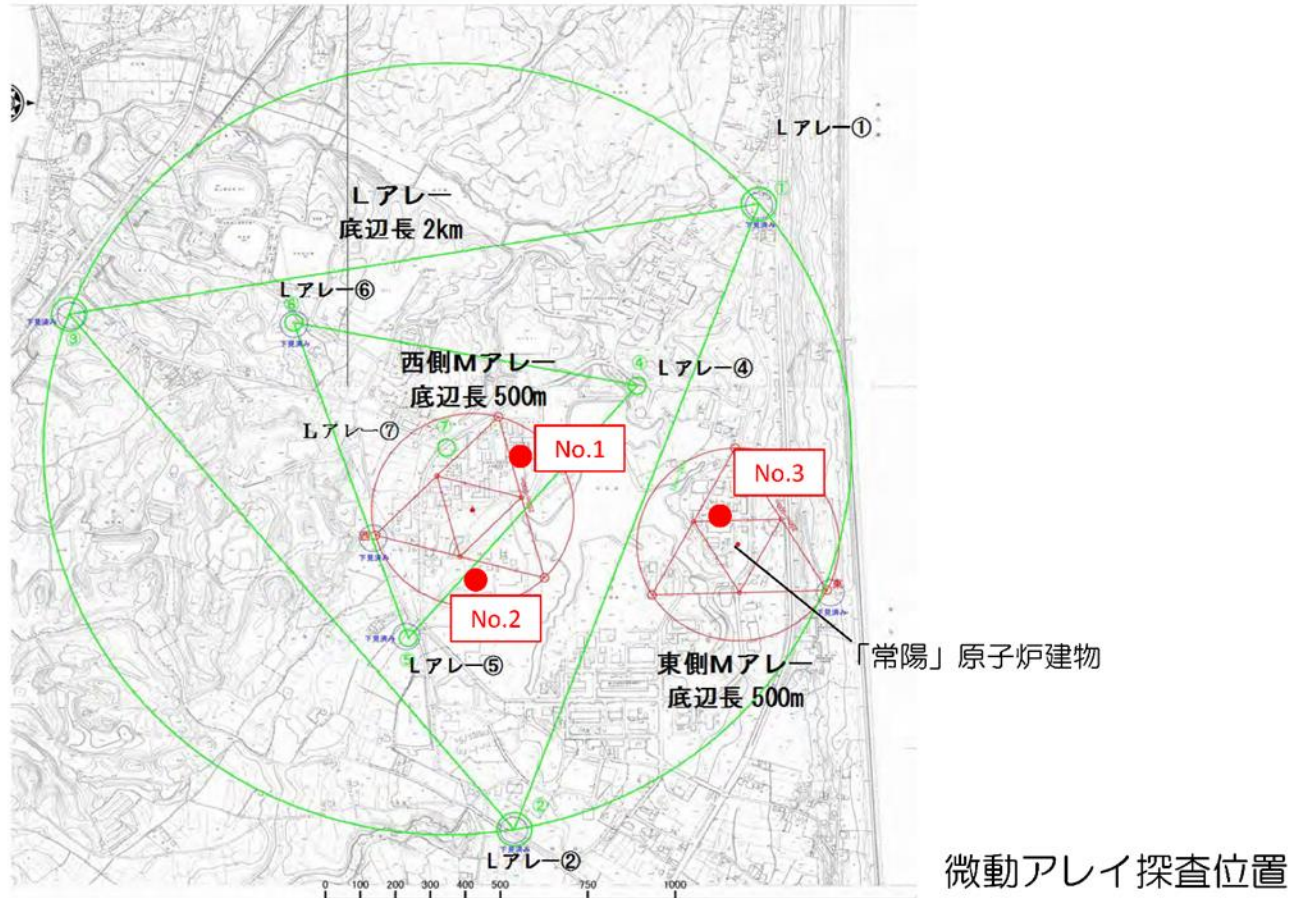


3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査位置と目的

敷地近傍の微動アレイ探査の主な目的としては、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ためである。



1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

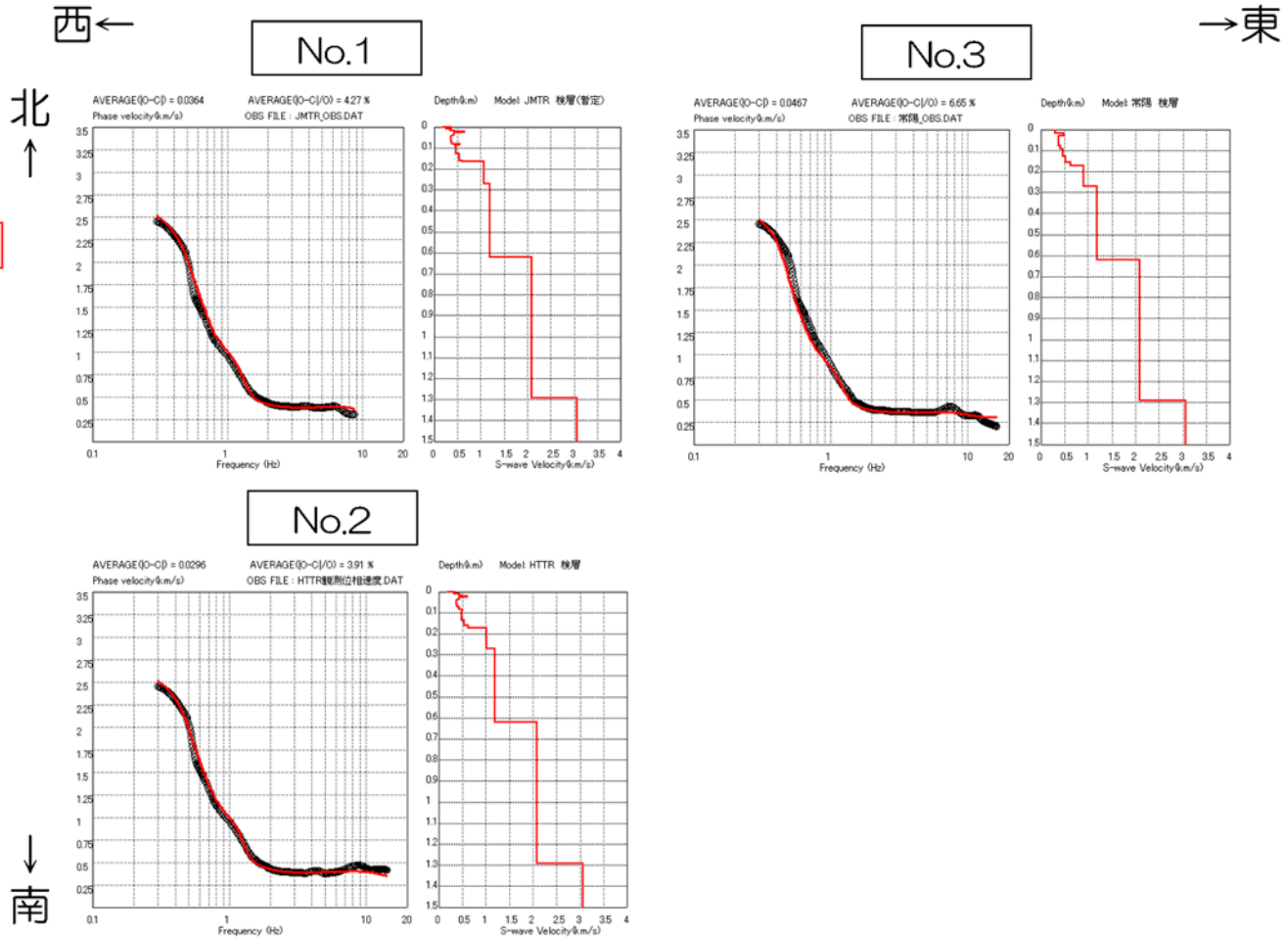
3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(3) 微動アレイ探査による検討

■ 微動アレイ探査結果



地震基盤相当（概ね Vs3km/s層）に着目すると、どの評価地点においても同様に評価されている。



1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

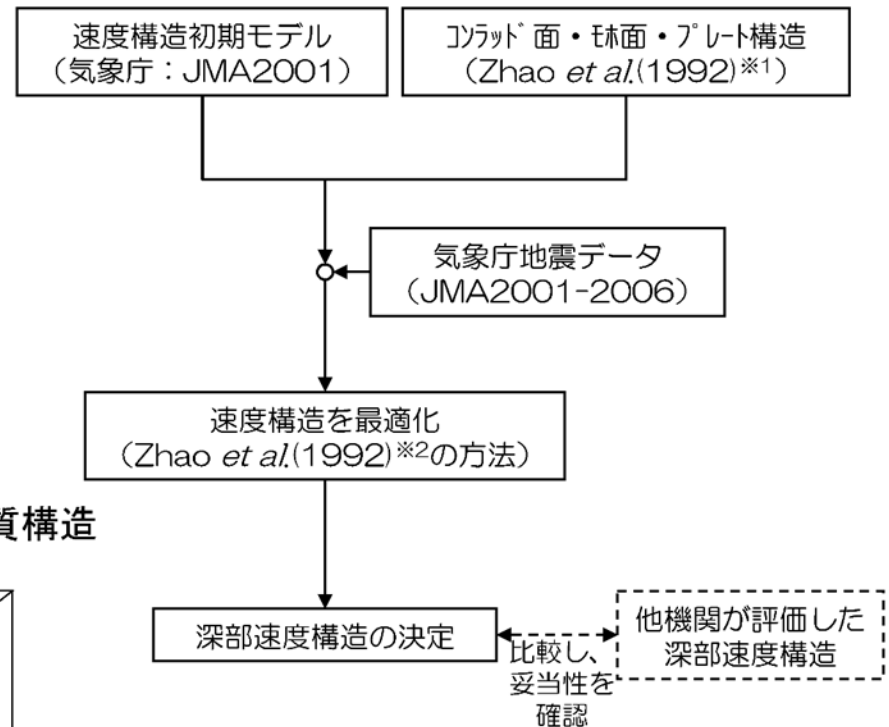
3. 地下構造評価 3.3 敷地の地震基盤及び深部地盤の速度構造の検討

(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

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、観測事実に則した最適な速度構造を求める。

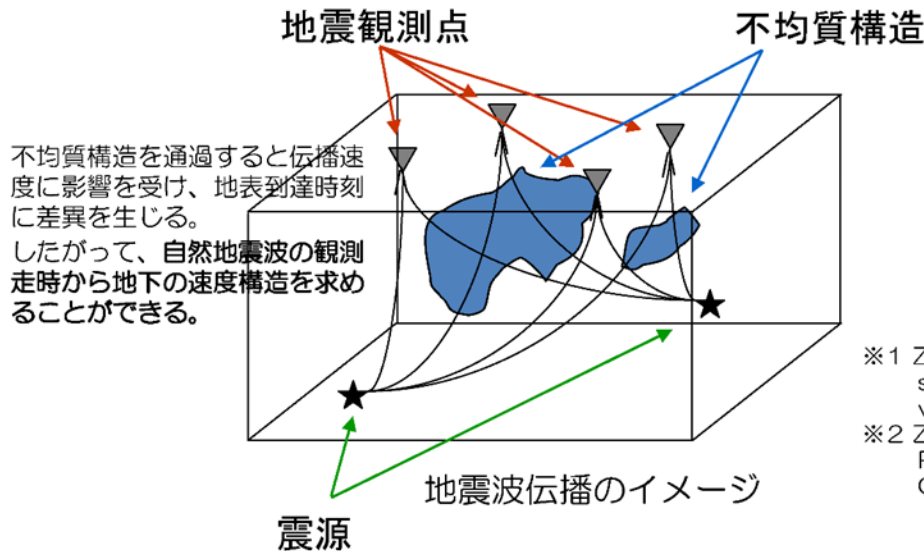
そのために、各地の地震観測点で記録された自然地震(主に微小~小地震)の波形記録から到達時刻を読み取ることで得られる観測走時をターゲットに、モデルによる計算走時を最適化することで深部の速度構造を評価する「**地震波速度トモグラフィ解析**」を用いた。



地震波速度トモグラフィ解析による
深部速度構造の評価手順

※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.



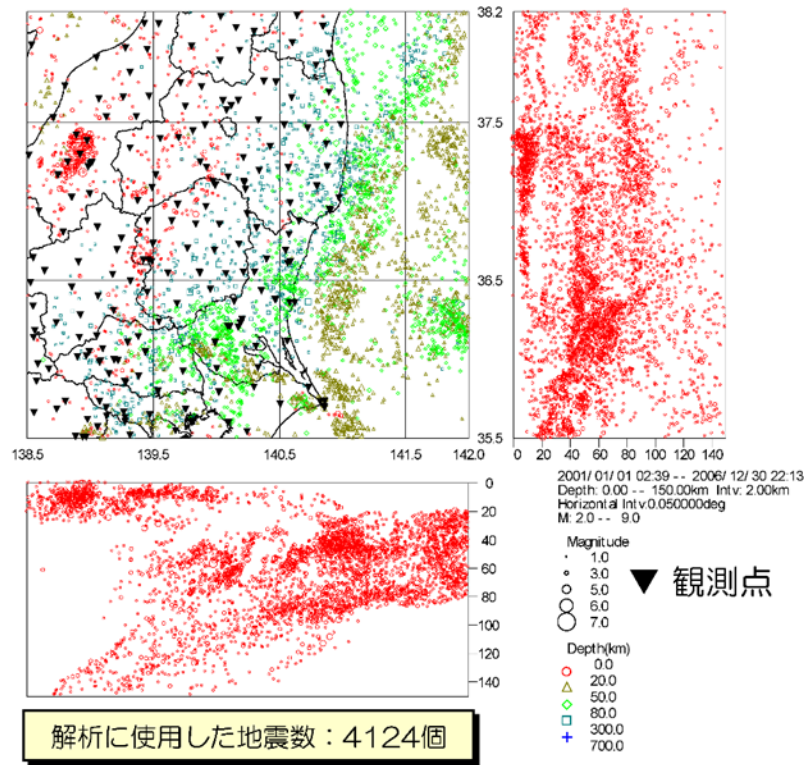
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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

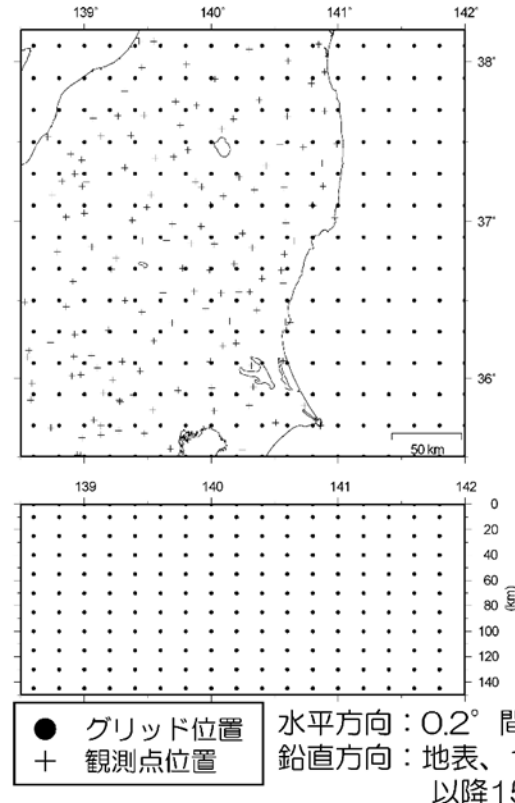
(4) 地震波速度トモグラフィ解析による検討

■ 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

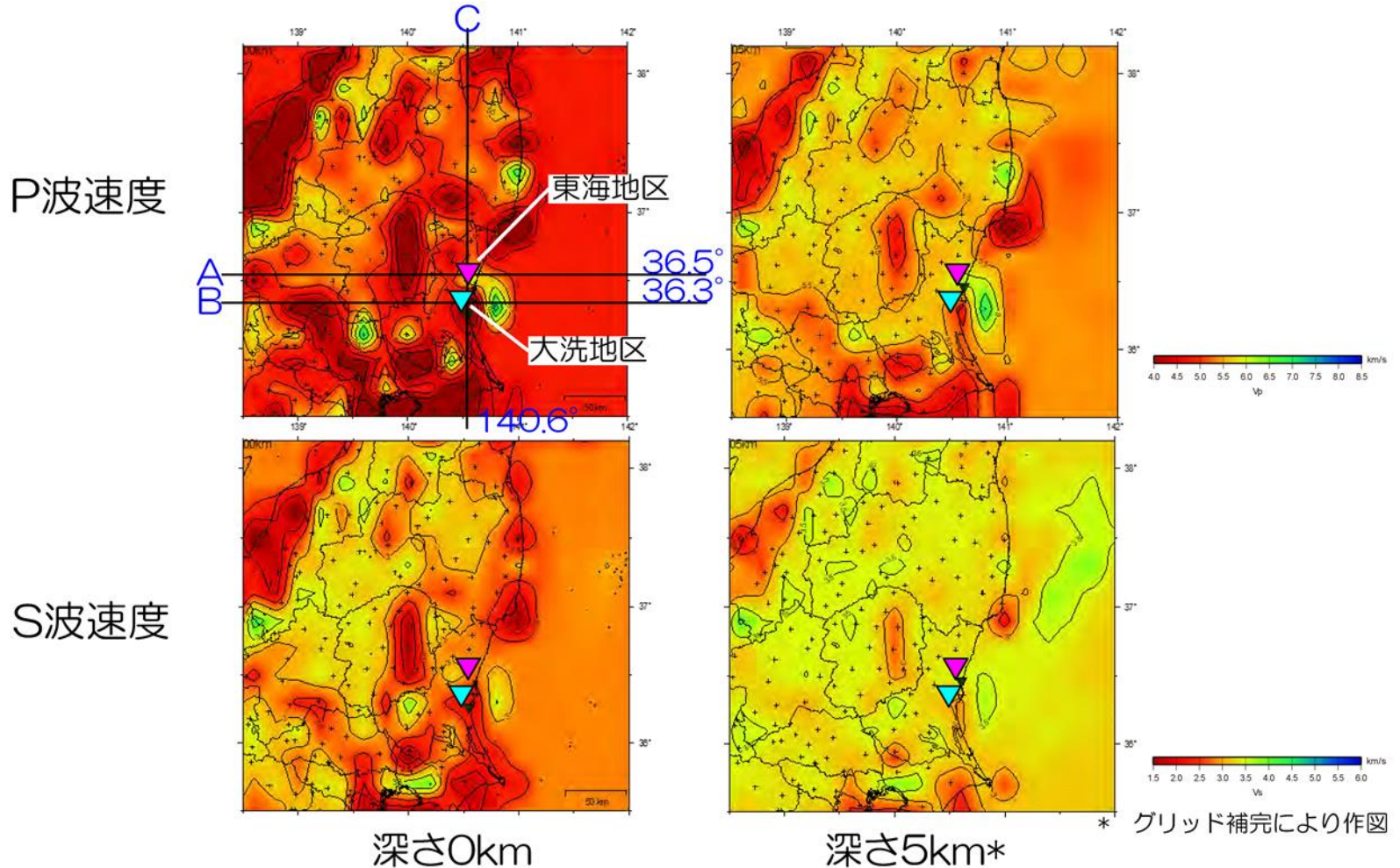
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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

(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。



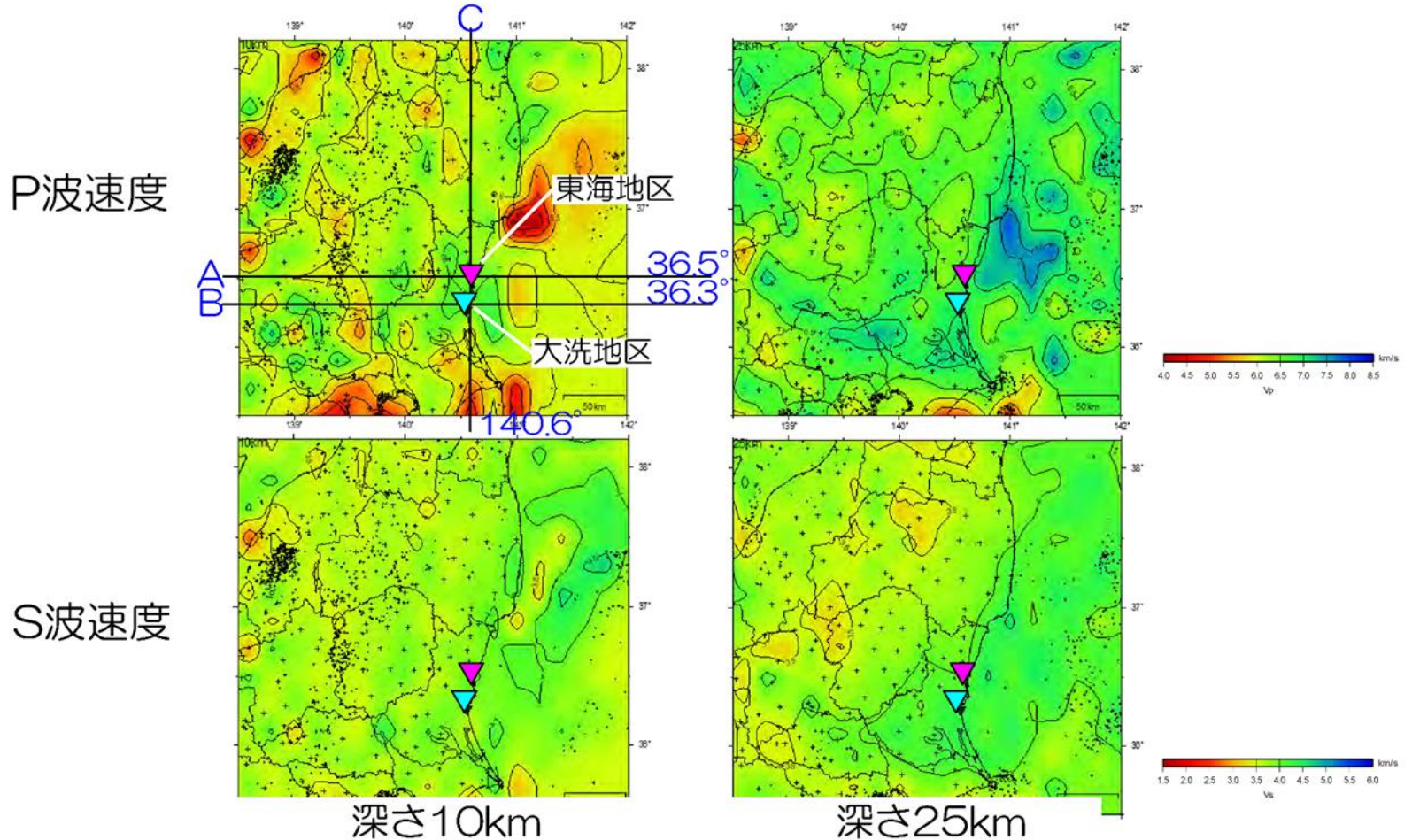
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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

(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。



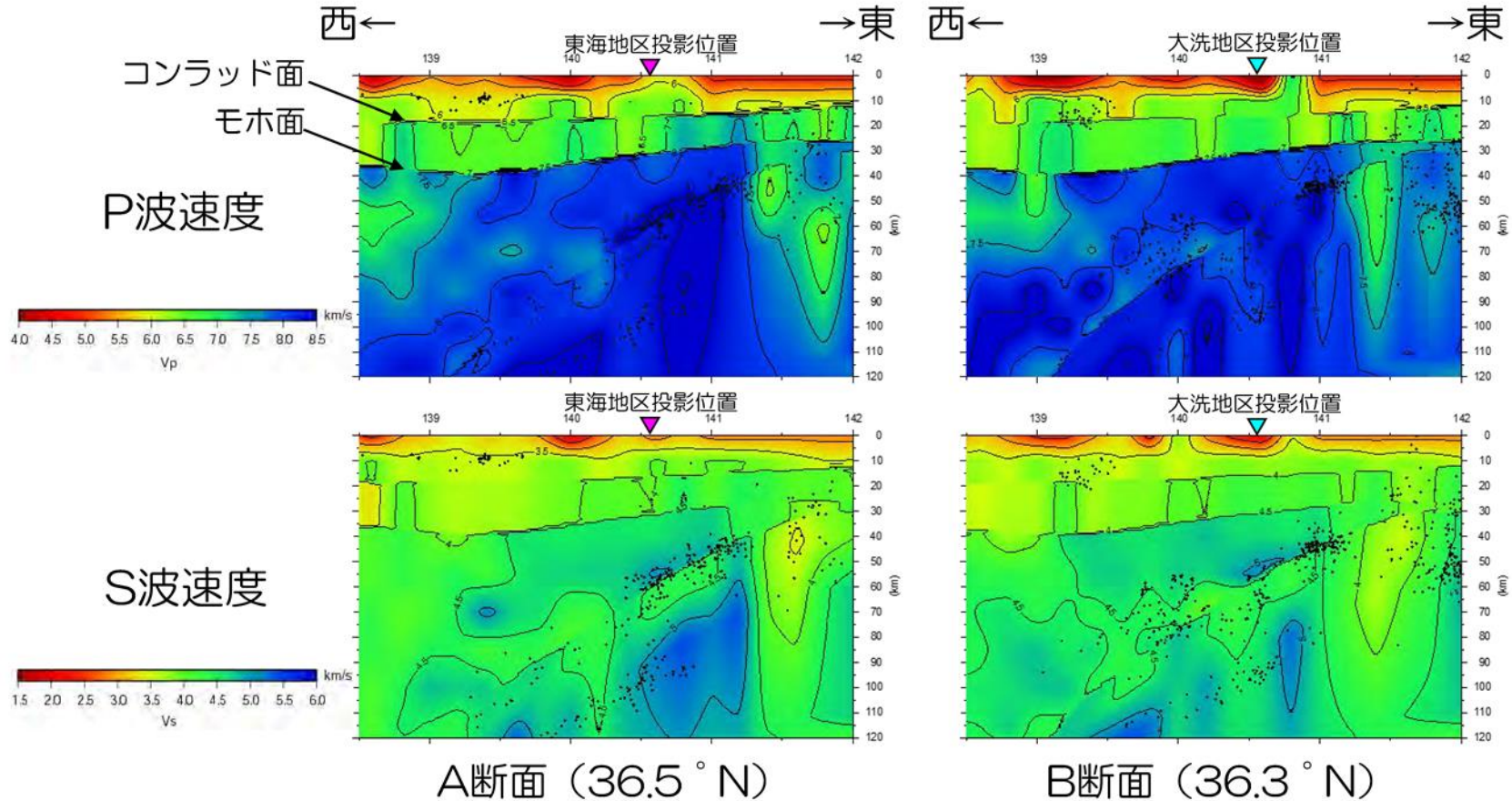
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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

(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。



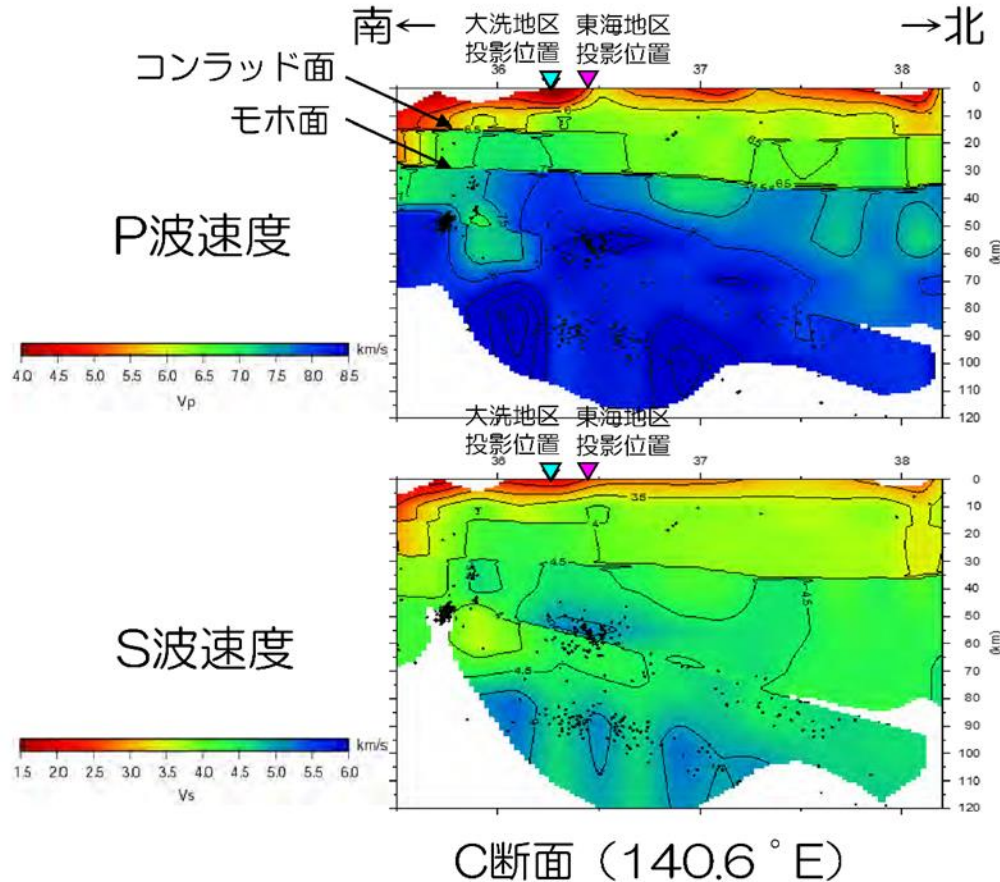
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

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

(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。



1. 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
 - 1.1 常陽の基準地震動 S_s 策定の概要
 - 1.2 常陽地点における地震動特性の分析
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

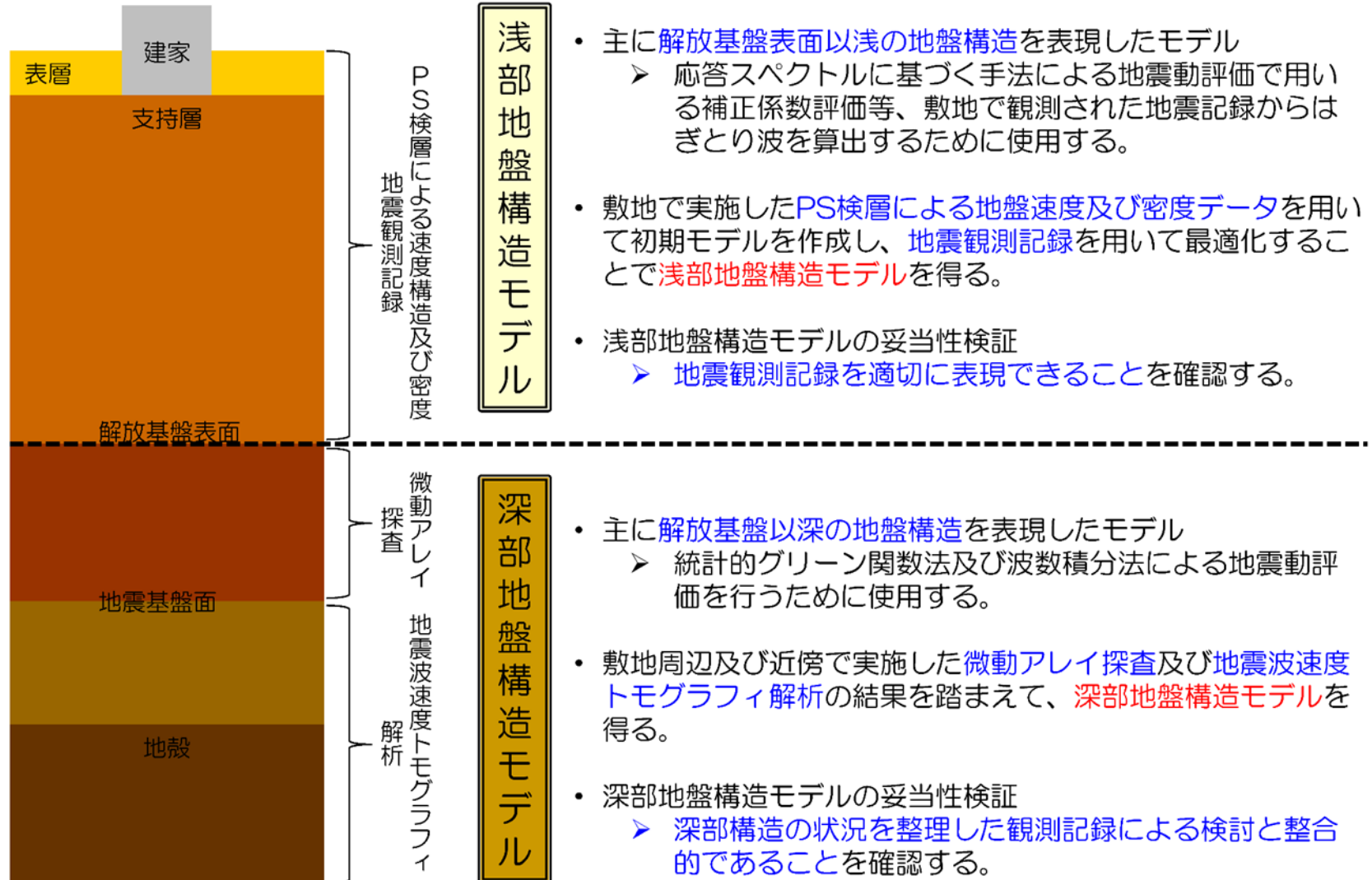
- 参考1 震源を特定せず策定する地震動(M_w 6.5以上の地震に関する検討)
- 参考2 「日本海溝沿いの地震活動の長期評価」に対する確認結果について
- 参考3 F3断層～F4断層におけるHTTR地点と常陽地点の等価震源距離の比較

参考文献

1. 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

設定の概要



1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

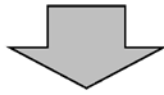
3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

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

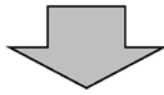


浅部地盤構造モデルの地盤同定解析

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4月11日 17:16 福島県浜通りの地震 (M7.0)
- 2011年4月11日 20:42 福島県浜通りの地震 (M5.9)
- 2011年4月12日 8:08 銚子付近の地震 (M6.4)
- 2011年4月12日 14:07 福島県浜通りの地震 (M6.4)

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



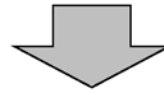
浅部地盤構造モデル

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

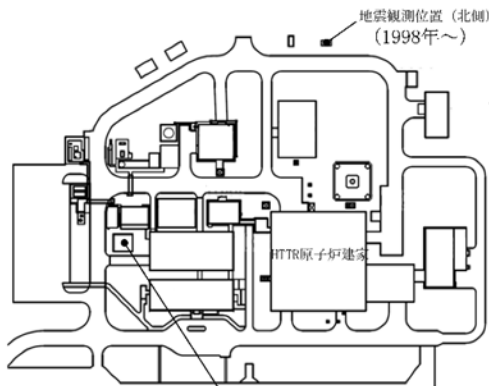
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)

3. 地下構造評価 3.4 敷地の地盤構造モデルの設定

初期地盤構造モデルの作成

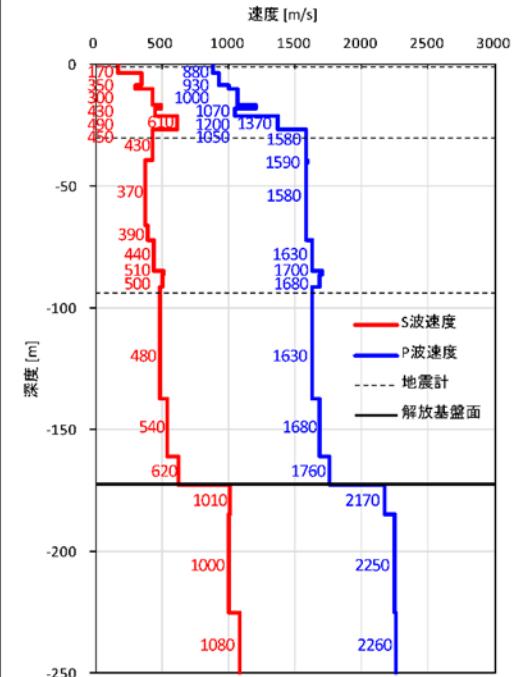
■ 初期地盤構造モデルの諸元

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。



標高	上面	層厚	密度	初期値	
				S波速度	P波速度
T.P (m)	G.L. (m)	t (m)	ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
▽	37.5	0.0	1.0	1.33	880
	36.5	-1.0	2.3	1.33	170
	34.2	-3.3	5.4	1.92	350
	28.8	-8.7	1.5	1.74	300
	27.3	-10.2	6.2	1.84	430
	21.1	-16.4	1.9	1.79	490
	19.2	-18.3	2.6	1.78	450
	16.6	-20.9	5.7	2.02	610
▽	10.9	-26.6	3.4	1.86	430
▽	7.5	-30.0	2.0	1.86	430
	5.5	-32.0	7.3	1.86	430
	-1.8	-39.3	1.1	1.89	370
	-2.9	-40.4	25.5	1.84	370
	-28.4	-65.9	6.3	1.81	390
	-34.7	-72.2	12.4	1.92	440
	-47.1	-84.6	1.4	2.05	510
	-48.5	-86.0	5.1	1.97	500
	-53.6	-91.1	2.9	1.79	480
▽	-56.5	-94.0	1.0	1.79	480
	-57.5	-95.0	42.1	1.79	480
	-99.6	-137.1	23.6	1.82	540
▼	-123.2	-160.7	11.8	1.81	620
	-135	-172.5	1.5	1.98	1010
	-136.5	-174.0	10.9	1.98	1010
	-147.4	-184.9	40.2	2.00	1000
▽	-187.6	-225.1	24.9	1.85	1080
	-212.5	-250.0	—	1.85	1080

▽ 地震計位置
▼ 解放基盤表面位置



1. 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

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定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-3m以浅)、上部層(GL-3m~27m)、中部層(GL-27m~91m)、下部層(GL-91m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

標高	上面	層厚	密度	水平方向			鉛直方向		
				S波速度	減衰定数h※		P波速度	減衰定数h※	
T.P. (m)	G.L. (m)	t (m)	ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	h0	α	Vp (m/s)	h0	α
37.5	0.0	1.0	1.33	153	0.565	0.734	819	0.25	1.194
36.5	-1.0	2.3	1.33	149			787		
34.2	-3.3	5.4	1.92	334	0.726	1.125	761	0.918	0.744
28.8	-8.7	1.5	1.74	300			940		
27.3	-10.2	6.2	1.84	439			880		
21.1	-16.4	1.9	1.79	447			1239		
19.2	-18.3	2.6	1.78	415			1020		
16.6	-20.9	5.7	2.02	527			1118		
10.9	-26.6	3.4	1.86	411	0.156	1.347	1354	0.922	1.094
7.5	-30.0	2.0	1.86	411			1354		
5.5	-32.0	7.3	1.86	448			1435		
-1.8	-39.3	1.1	1.89	387			1696		
-2.9	-40.4	25.5	1.84	372			1633		
-28.4	-65.9	6.3	1.81	383			1595		
-34.7	-72.2	12.4	1.92	398			1768		
-47.1	-84.6	1.4	2.05	514			1664		
-48.5	-86.0	5.1	1.97	482			1735		
-53.6	-91.1	2.9	1.79	452			0.064			0.859	1668	0.667	1.719
-56.5	-94.0	1.0	1.79	452	1668				
-57.5	-95.0	42.1	1.79	501	1670				
-99.6	-137.1	23.6	1.82	609	1928				
-123.2	-160.7	11.8	1.81	663	1978				
-135.0	-172.5	1.5	1.98	1010	2170				
-136.5	-174.0	10.9	1.98	1010	2170				
-147.4	-184.9	40.2	2.00	1000	2250				
-187.6	-225.1	24.9	1.85	1080	2260				
-212.5	-250.0	∞	1.85	1080	2260				

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

1. 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定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-3m以下)、上部層(GL-3m~27m)、中部層(GL-27m~91m)、下部層(GL-91m以下)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として採用
- 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、解放基盤表面以下は固定)
 - 【減衰定数】
 $h(f) = h_0 \times f^{-\alpha}$
 h_0 は0.0~1.0
 α は0.0~1.0

標高	上面	層厚	密度	NS方向			EW方向			鉛直方向		
				S波速度	減衰定数h※		S波速度	減衰定数h※		P波速度	減衰定数h※	
T.P. (m)	G.L. (m)	t (m)	ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	h0	α	Vs (m/s)	h0	α	Vp (m/s)	h0	α
37.5	0.0	1.0	1.33	151	0.641	0.266	148	0.547	0.344	740	0.484	0.188
36.5	-1.0	2.3	1.33	147			137			712		
34.2	-3.3	5.4	1.92	282	0.188	0.297	302	0.266	0.438	744	0.531	0.344
28.8	-8.7	1.5	1.74	240			404			938		
27.3	-10.2	6.2	1.84	434			513			1227		
21.1	-16.4	1.9	1.79	451			480			1127		
19.2	-18.3	2.6	1.78	391			538			1522		
16.6	-20.9	5.7	2.02	500								
10.9	-26.6	3.4	1.86	363	0.078	0.922	344	0.125	0.844	1284	0.563	0.922
7.5	-30.0	2.0	1.86	450			382			1645		
5.5	-32.0	7.3	1.86	450			382			1645		
-1.8	-39.3	1.1	1.89	364			352			1444		
-2.9	-40.4	25.5	1.84	298			355			1856		
-28.4	-65.9	6.3	1.81	411			354			1495		
-34.7	-72.2	12.4	1.92	450			514			1884		
-47.1	-84.6	1.4	2.05	414			586			1490		
-48.5	-86.0	5.1	1.97	549			438			1589		
-53.6	-91.1	2.9	1.79	442			0.063			0.797			509	0.063	0.703	1708	0.297	0.953
-56.5	-94.0	1.0	1.79	558	485	1656						
-57.5	-95.0	42.1	1.79	558	485	1656						
-99.6	-137.1	23.6	1.82	583	593	1771						
-123.2	-160.7	11.8	1.81	669	535	2090						
-135.0	-172.5	1.5	1.98	1010	1010	2170						
-136.5	-174.0	10.9	1.98	1010	1010	2170						
-147.4	-184.9	40.2	2.00	1000	1000	2250						
-187.6	-225.1	24.9	1.85	1080	1080	2260						
-212.5	-250.0	∞	1.85	1080	1080	2260						

※ $h = h_0 \times F^\alpha$; ここでfは周波数(Hz)

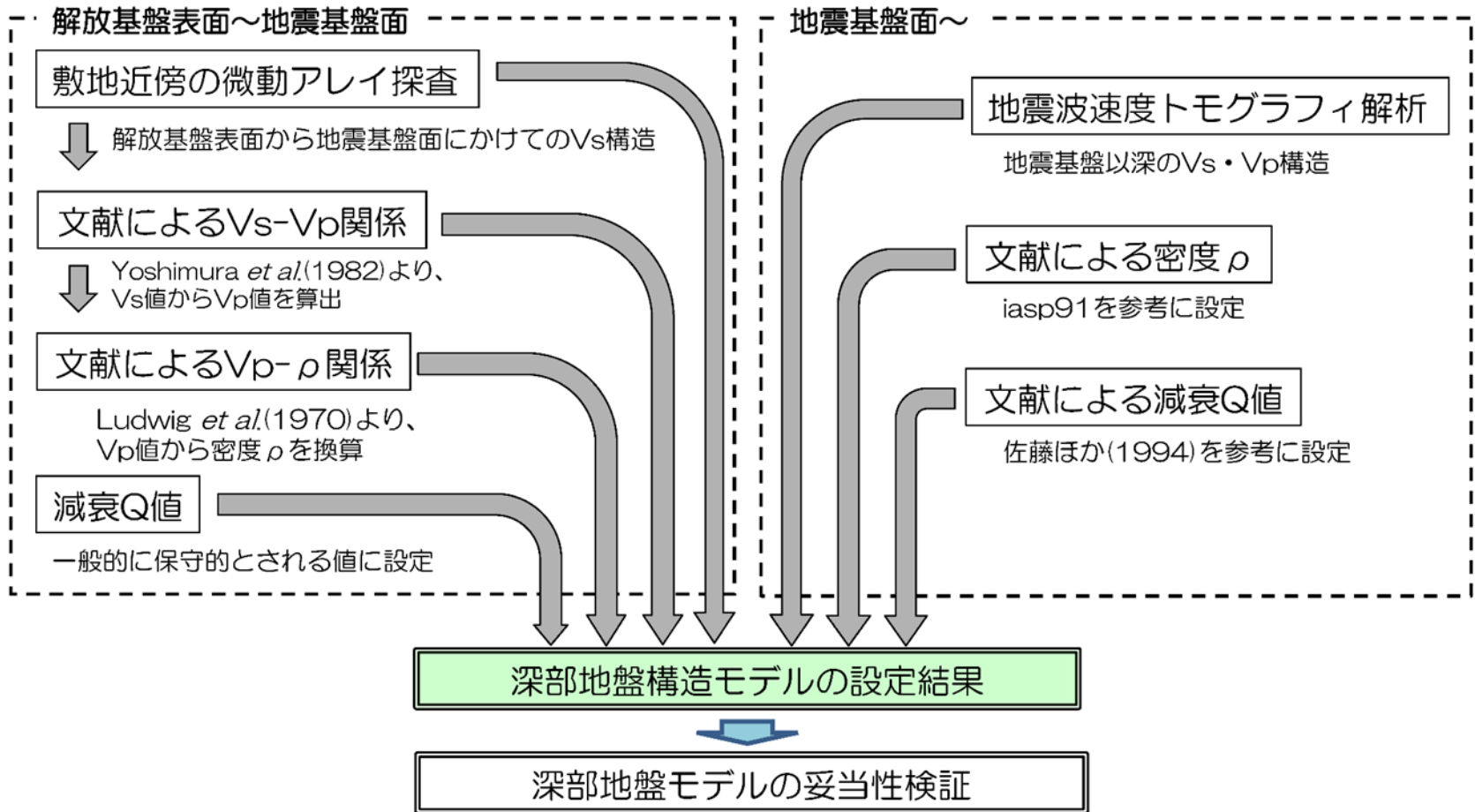
1. 地盤構造モデルの設定根拠(審査資料抜粋)



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手順

深部地盤構造モデルの設定手順を以下に示す。



1. 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。

標高	上面	層厚	密度	水平方向		鉛直方向		
				S波速度	減衰定数	P波速度	減衰定数	
T.P. (km)	G.L. (km)	t (km)	ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	Qs	Vp (km/s)	Qp	
0.038	0.000	0.173	-	-	-	-	-	浅部地盤構造モデルと同様
-0.135	-0.173	0.100	1.98	1.010	100	2.170	100		微動アレイ探査結果より設定
-0.235	-0.273	0.350	2.11	1.186		2.590		
-0.585	-0.623	0.670	2.44	2.086		4.100		
-1.255	-1.293	2.708	2.68	3.052	110 × f ^{0.69}	5.750	110 × f ^{0.69}	地震波速度トモグラフィ解析結果より設定
-3.963	-4.000	11.900	2.70	3.600		5.960		
-15.863	-15.900	14.600	2.80	4.170		6.810		
-30.463	-30.500	∞	3.20	4.320		7.640		

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の関係式より算出

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.