

女川原子力発電所2号炉
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)

2021年9月3日
東北電力株式会社

会合におけるコメント

No.	コメント時期	コメント内容	今回ご説明資料 掲載箇所
1	2021年7月2日 第3回会合	地震基盤相当面と解放基盤表面の地盤補正として基準地震動Ss-D1の応答スペクトル比を用いた評価結果の妥当性確認の観点から、標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を用いた検討等を示すこと。	p.12～p.17
2	2021年7月2日 第3回会合	女川原子力発電所では強震記録を含む多くの地震観測記録が得られていることから、基準地震動の応答スペクトル比を用いた地盤補正の適切性の説明性向上として、地震基盤相当面や解放基盤表面位置における地震観測記録を用いた検討を行うこと。	p.12, p.18～p.24

目次

1. 検討方針	.....	3
2. 応答スペクトル比による影響検討	.....	5
3. まとめ	.....	10
補足検討		
1. 補足検討の概要	.....	12
2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討	.....	13
3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討	.....	18
4. 各種方法で求めた解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと 基準地震動 S_s -D1, S_s -D2及び S_s -D3との比較	.....	25
参考資料		
1. 発電用原子炉設置変更許可申請書(抜粋)	.....	26
2. 新規制基準適合性に係る審査会合資料(抜粋)	.....	32
3. 女川原子力発電所2号炉 基準地震動の変更が不要であることを説明する文書	.....	56

1. 検討方針

(1) 標準応答スペクトルの概要と検討方針

➤ 新たに制定された標準応答スペクトルに基づく地震動と基準地震動を比較し影響を確認する。

➤ 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 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。)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。)として次の図に示すもの。

令和3年4月21日 原規技発第2104216号 原子力規制委員会決定「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正について」による。

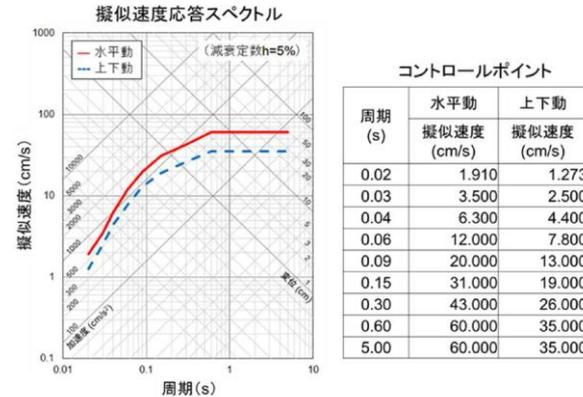


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル



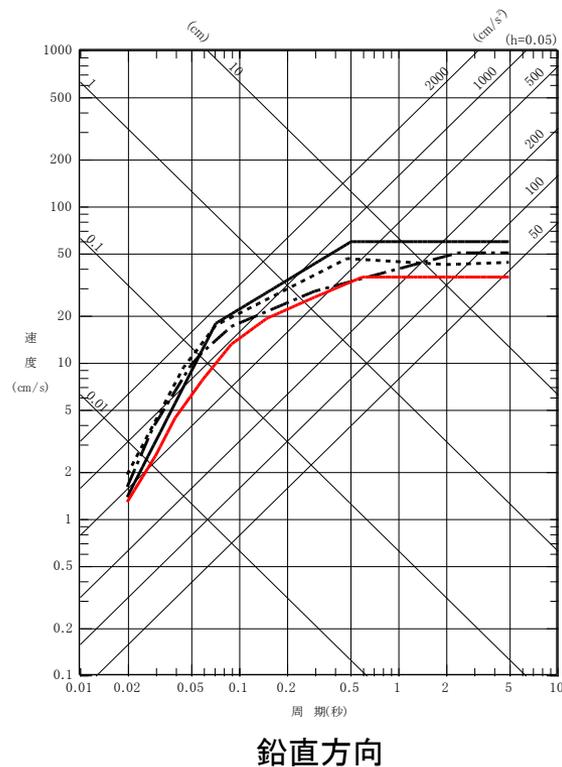
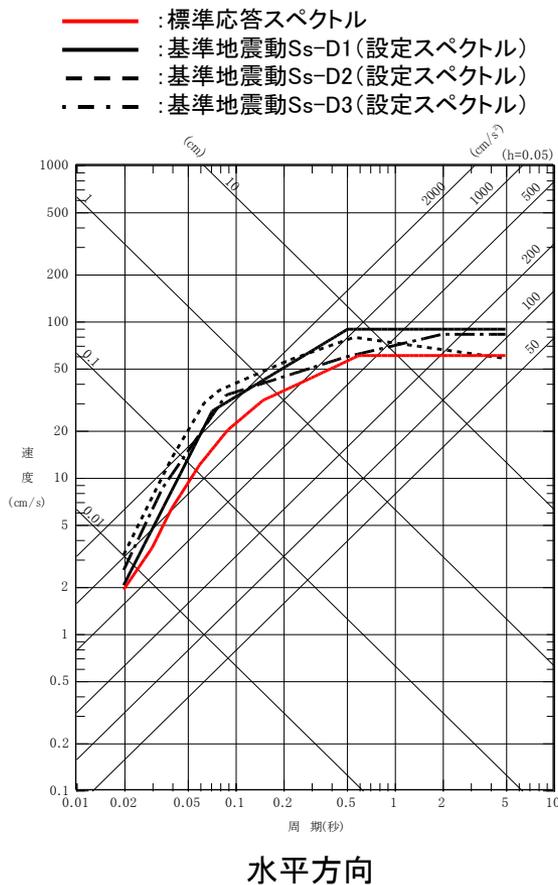
女川原子力発電所2号炉	検討方針
<p>解放基盤表面*のせん断波速度V_s</p> <p>1500m/s</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 標準応答スペクトルに対し、地震基盤相当面(せん断波速度$V_s=2200\text{m/s}$)から解放基盤表面(せん断波速度$V_s=1500\text{m/s}$)までの補正を行い、基準地震動と比較し影響を確認する。 ➤ 標準応答スペクトルと同様に応答スペクトルとして定義されたNoda et al.(2002)では、地震基盤における応答スペクトルから解放基盤表面における応答スペクトルを求めるにあたり地盤増幅率を用いていること等を踏まえ、補正は所定の比率を標準応答スペクトルに乗ずることにより行う。 ➤ 具体的には、標準応答スペクトルと基準地震動S_s-D1の応答スペクトルの形状が類似していることから(次頁参照)、地盤補正としては、基準地震動S_s-D1の模擬地震波を統計的グリーン関数法で用いる地下構造モデルを介して地震基盤相当面まで引き戻し、その引き戻し波の応答スペクトルと解放基盤表面位置における基準地震動S_s-D1の応答スペクトルの比を採用する。

※: 解放基盤表面の位置は、原子炉建屋設置レベルであるO.P.-14.1m。
 解放基盤表面の振動特性は、自由地盤の岩盤上部の地震観測点(O.P.-8.6m)で代表する。
 O.P.(女川原子力発電所工事用基準面) $\pm 0\text{m}=\text{T.P.}$ (東京湾平均海面) -0.74m

1. 検討方針

(2) 標準応答スペクトルと女川原子力発電所の基準地震動(設定スペクトル)

- 標準応答スペクトルと基準地震動S_s-D1, S_s-D2及びS_s-D3の応答スペクトルを示す。〔基準地震動については、参考資料(p.51~p.55)参照〕
- 女川原子力発電所2号炉では、応答スペクトル手法に基づく基準地震動としてはS_s-D1の他に、S_s-D2及びS_s-D3を設定しているが、これらは海洋プレート内地震を対象に設定した基準地震動であり、標準応答スペクトルとの形状の類似性はS_s-D1より劣るため、地盤補正には使用していない。



2. 応答スペクトル比による影響検討

(1) 検討概要

1. 標準応答スペクトルに基づく地震動(解放基盤表面位置における標準応答スペクトル)の算定

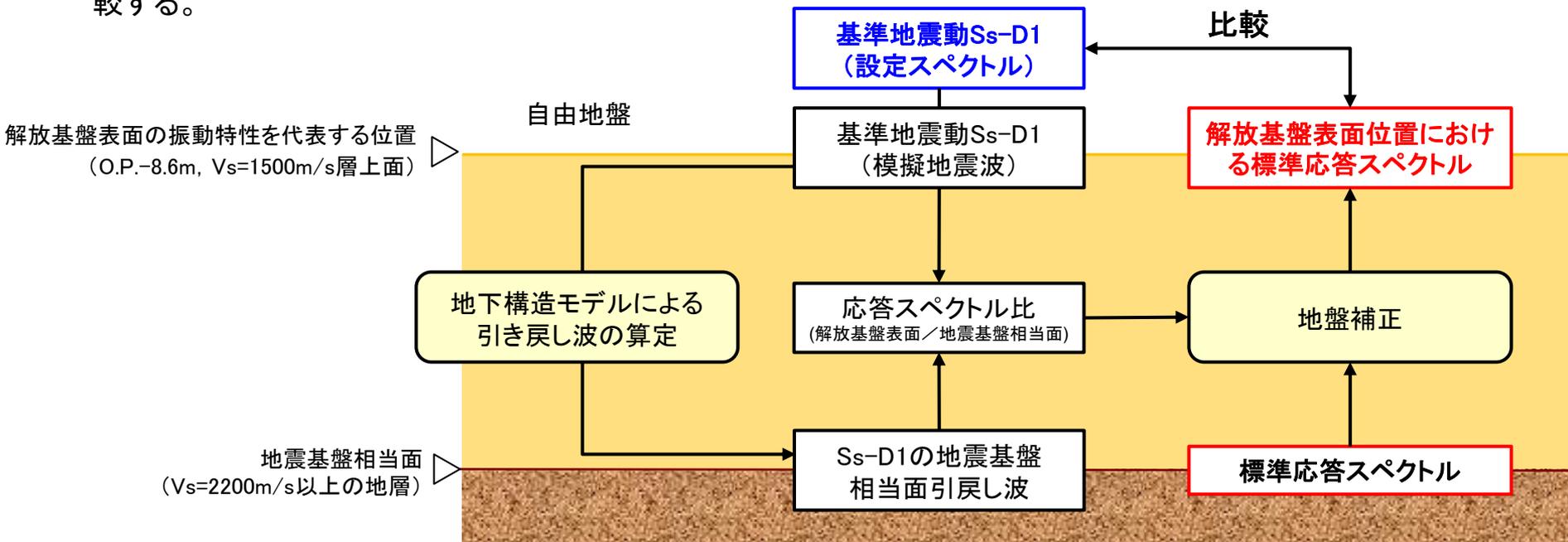
- 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルを以下のように算定する。

解放基盤表面位置における標準応答スペクトル = 標準応答スペクトル × 地盤補正

$$= \text{標準応答スペクトル} \times \frac{\text{基準地震動Ss-D1(模擬地震波)の応答スペクトル}}{\text{地震基盤相当面に引き戻したSs-D1の応答スペクトル}}$$

2. 基準地震動Ssとの比較

- 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動Ss-D1の設定スペクトル(デザインスペクトル)を比較する。



検討概要図

2. 応答スペクトル比による影響検討

(2) 地盤補正に用いる地下構造モデル

- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面で定義されており、当該地盤においては $V_s=2200\text{m/s}$ 層上面(O.P.-42.8m)が該当するため、当該レベルから解放基盤表面〔基準地震動の振動特性を代表する位置(O.P.-8.6m, $V_s=1500\text{m/s}$ 層上面)〕までの地盤補正を行う。
- 地盤補正に用いる地下構造モデルは、統計的グリーン関数法^{※1}で用いた地下構造モデルとする。

※1: 女川原子力発電所の基準地震動(断層モデル手法)は、統計的グリーン関数法に基づき策定している。

統計的グリーン関数法による地震動評価に用いた地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t / m ³)	V_s (m / s)	V_p (m / s)	減衰 (%)
G.L.(m)	O.P.(m) ^{※2}					
-27.3	-8.6					
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882	3.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	
-147.1	-128.4	65.3		2600	5300	
-	-	∞	2.68	3000	-	※3

◀ 解放基盤表面の振動特性を代表する位置

◀ 地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 層上面)

※2: O.P.(女川原子力発電所工事用基準面)±0m=T.P.(東京湾平均海面)-0.74m

※3: 内陸地殻内地震 [地震調査研究推進本部(2005):宮城県沖地震を想定した強震動評価(一部修正版)による]

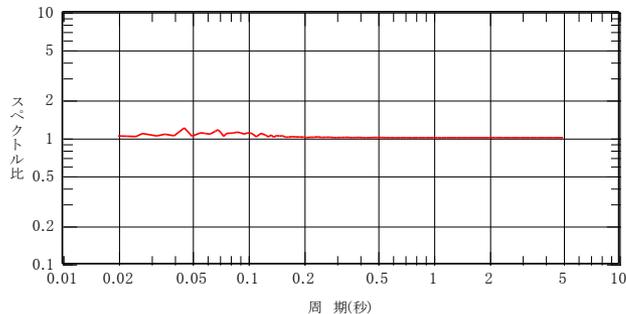
$Q(f)=110 \cdot f^{0.69}$ ($f \geq 1\text{Hz}$), 110 ($f < 1\text{Hz}$)

2. 応答スペクトル比による影響検討

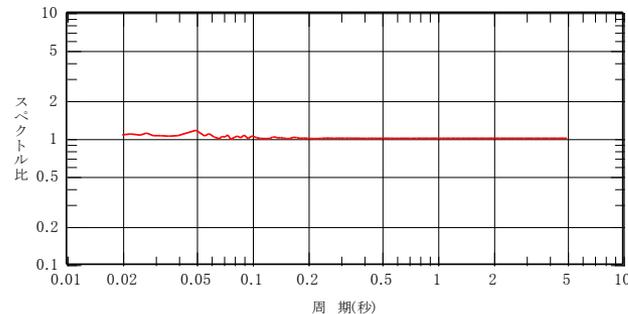
(3) 標準応答スペクトルの地盤補正

- ①基準地震動S_s-D1(模擬地震波)の応答スペクトルと②地震基盤相当面(V_s=2200m/s層上面)に引戻した基準地震動S_s-D1の応答スペクトルの比(①/②)を地盤補正とする。

— : 応答スペクトル比(①S_s-D1/②地震基盤相当面でのS_s-D1)

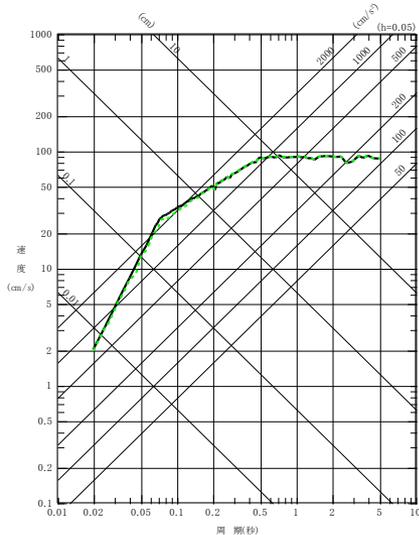


応答スペクトル比(水平方向)

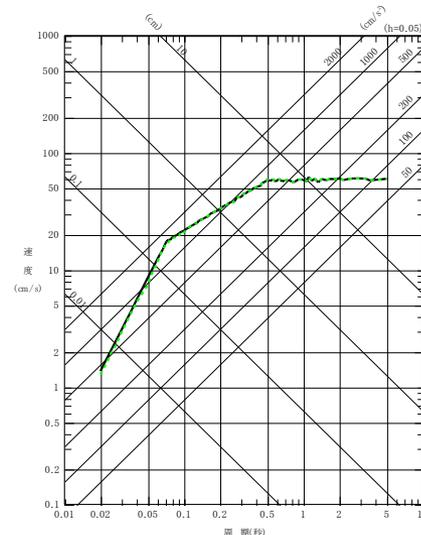


応答スペクトル比(鉛直方向)

— : ①基準地震動S_s-D1(模擬地震波)
- - - : ②地震基盤相当面(V_s=2200m/s層上面)に引戻した基準地震動S_s-D1



応答スペクトル(水平方向)



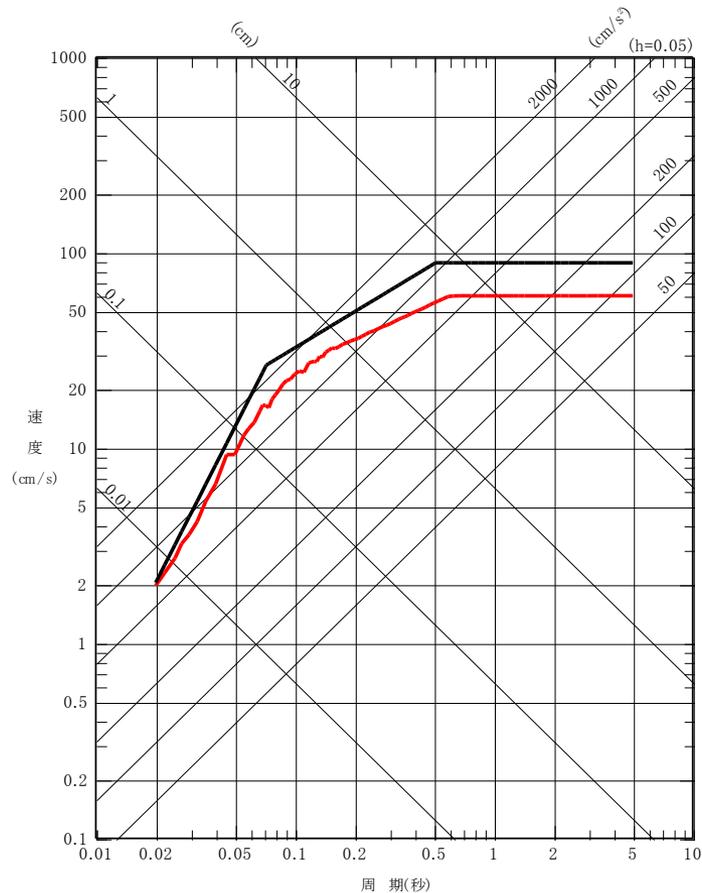
応答スペクトル(鉛直方向)

2. 応答スペクトル比による影響検討

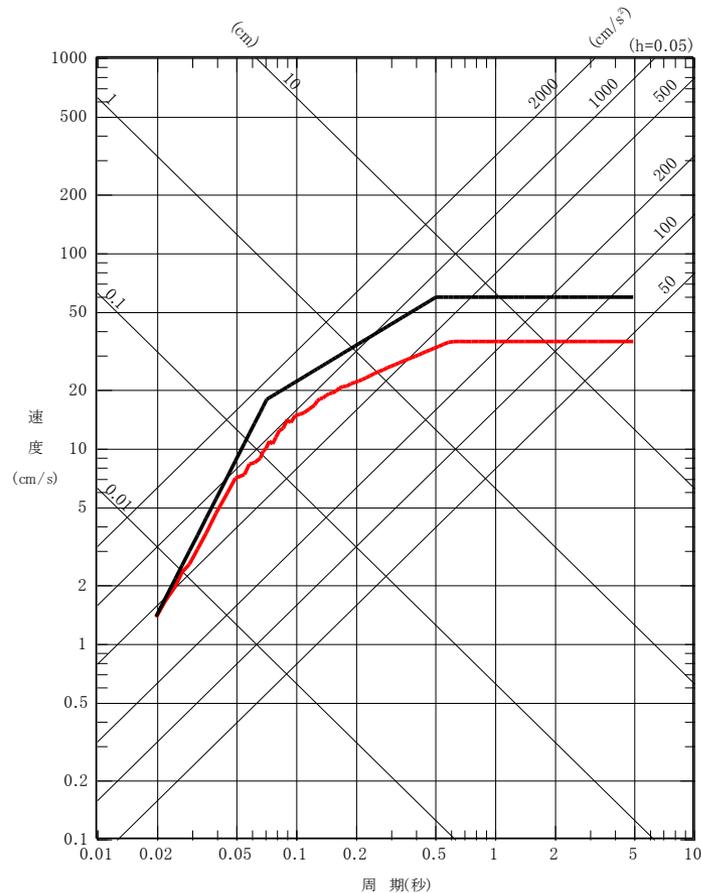
(4) 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動の比較①

- 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルは基準地震動 S_s -D1(設定スペクトル)に包絡される。

— : 解放基盤表面位置における標準応答スペクトル
— : 基準地震動 S_s -D1(設定スペクトル)



水平方向



鉛直方向

解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動 S_s -D1(設定スペクトル)

2. 応答スペクトル比による影響検討

(4) 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動の比較②

- ▶ 解放基盤表面位置における標準応答スペクトルは基準地震動 S_s -D1(設定スペクトル)に包絡される。

解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動 S_s -D1(設定スペクトル)の疑似速度(cm/s)

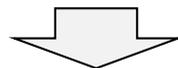
周期※1 (s)	水平方向 疑似速度(cm/s)			鉛直方向 疑似速度(cm/s)		
	標準応答 スペクトル	解放基盤表面位置にお ける標準応答スペクトル	S_s -D1※2	標準応答 スペクトル	解放基盤表面位置にお ける標準応答スペクトル	S_s -D1※2
0.02	1.910	1.967	2.0372	1.273	1.353	1.3687
0.03	3.500	3.711	4.6	2.500	2.634	3.1
0.04	6.300	6.514	8.2	4.400	4.616	5.5
0.06	12.000	12.850	18.4	7.800	8.284	12.3
0.09	20.000	21.867	30.4	13.000	13.556	20.3
0.15	31.000	31.816	41.6	19.000	18.943	27.8
0.30	43.000	43.016	63.8	26.000	26.013	42.6
0.60	60.000	59.514	88.4	35.000	34.721	59.0
5.00	60.000	60.000	88.4	35.000	34.992	59.0

※1: 周期は標準応答スペクトルのコントロールポイントを示す。

※2: 赤文字は基準地震動 S_s -D1のコントロールポイントを用いて両対数グラフでの線形補間により求めた値。

3. まとめ

- 女川原子力発電所2号炉について、新たに制定された標準応答スペクトルに基づく地震動と基準地震動を比較した。
- 比較にあたっては、標準応答スペクトルはせん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地震基盤相当面にて定義されており、女川原子力発電所の解放基盤表面の振動特性は自由地盤の地震観測点O.P.-8.6m(岩盤上部： $V_s=1500\text{m/s}$)で代表させていることから、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地盤補正を行い、解放基盤表面相当位置での標準応答スペクトルを算定した。地盤補正としては、各位置における基準地震動 $S_s\text{-D1}$ の応答スペクトル比を用いた。
- 算定された解放基盤表面位置における標準応答スペクトルは、基準地震動 $S_s\text{-D1}$ に包絡された。



以上のことから、基準地震動の変更は不要と判断する。

補足検討

1. 補足検討の概要
2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討
3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討
4. 各種方法で求めた解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動 S_s -D1, S_s -D2及び S_s -D3との比較

1. 補足検討の概要

【地盤補正として基準地震動S_s-D1の応答スペクトル比を用いた評価結果の概要】

- 基準地震動S_s-D1の応答スペクトル比を用いた地盤補正を行うことにより解放基盤表面位置で算定した標準応答スペクトルは、基準地震動S_s-D1の設定スペクトル(デザインスペクトル)に包絡される。
- 地盤補正として基準地震動の応答スペクトル比を用いる検討については、標準応答スペクトルが“応答スペクトル”として設定されていること及びその検討会での検討過程^{※1}を踏まえ、応答スペクトルに地盤補正を行うNoda et al.(2002)の考え方を参考としている。
- また、地盤補正に用いた応答スペクトル比は、基準地震動S_s-D1と標準応答スペクトルのスペクトル形状が類似していることを踏まえており^{※2}、算定結果の信頼性は確保されていると考えられる。

※1:「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」においては、地盤補正にNoda et al.(2002)の地盤増幅率を使用している。
 ※2: 女川原子力発電所2号炉では、応答スペクトル手法に基づく基準地震動としてはS_s-D1の他に、S_s-D2及びS_s-D3を設定しているが、これらは海洋プレート内地震を対象に設定した基準地震動であり、標準応答スペクトルとの形状の類似性はS_s-D1より劣るため、地盤補正には使用していない。



応答スペクトル比による評価結果の妥当性の確認等

【補足検討の概要】

【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討

応答スペクトル比を用いた評価結果の妥当性確認の観点から、地震基盤相当面の標準応答スペクトルに適合した一様乱数の位相特性を持つ模擬地震波を作成し、それを解放基盤表面まで引き上げた地震動と基準地震動を比較する。

【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

応答スペクトル比を用いた地盤補正の適切性の説明性向上として、敷地での地震観測記録を用いた検討を行う。

- ①地下構造モデルと観測記録の整合性の確認(応答スペクトルでの確認)
- ②観測記録と整合するはざと地下構造モデルを標準応答スペクトルに適合する模擬地震波の上昇計算に用いた場合の地震動評価
- ③観測記録の位相を用いた標準応答スペクトルに適合する模擬地震波による検討

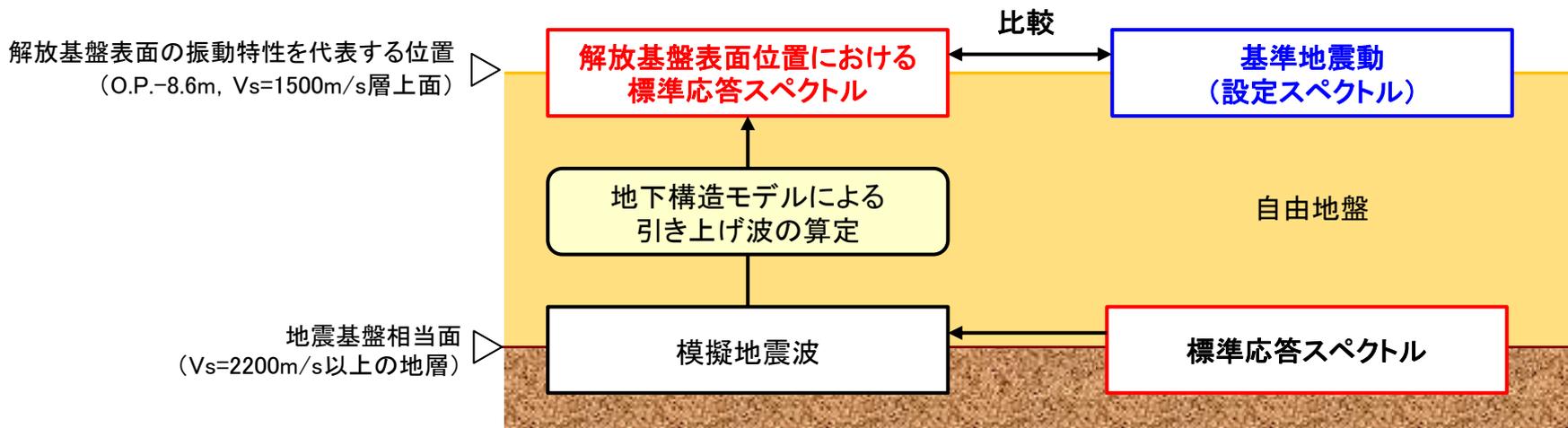
2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討

(1) 検討の概要

- ▶ 地震基盤相当面において作成した標準応答スペクトルに対し所定の適合度^{※1}を有する模擬地震波を、統計的グリーン関数法で用いた地下構造モデル(p.6参照)により解放基盤表面位置まで引き上げた地震動の応答スペクトルが、基準地震動の設定スペクトルに包絡されることを確認する。

※1: 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-2015(日本電気協会, 2016)に示される以下の適合度の条件を満足するように作成する。

- ① 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が全周期帯で0.85以上
- ② 目標とする応答スペクトル強さに対する模擬地震波の応答スペクトル強さの比(SI比, 周期0.1~2.5秒)が1.0以上



検討概要図

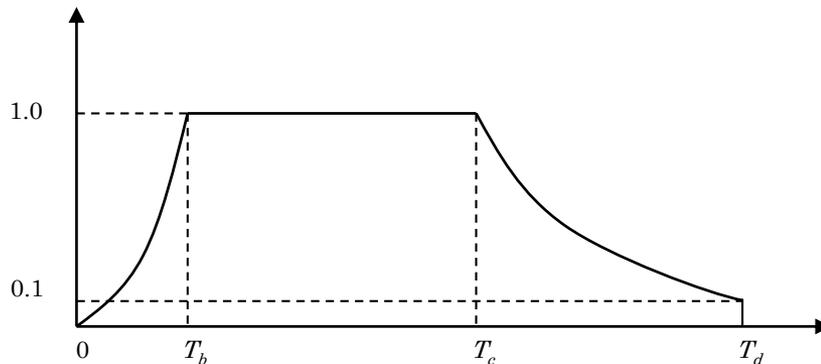
2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討

(2) 模擬地震波の作成方法

- 模擬地震波は一様乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する。
- 振幅包絡線の経時的変化は、以下の諸元を用いてNoda et al.(2002)*の方法により評価する。
- ・振幅包絡線の経時的変化算定の諸元: マグニチュード6.9(Mw6.5相当), 等価震源距離10km(震源近傍として想定)

*: Noda, S., K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe (2002): RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations Between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis. Oct. 16-18, Istanbul

マグニチュード M	等価震源距離 Xeq(km)	振幅包絡線の経時的変化(s)		
		Tb	Tc	Td(継続時間)
6.9	10	3.31	15.06	28.03



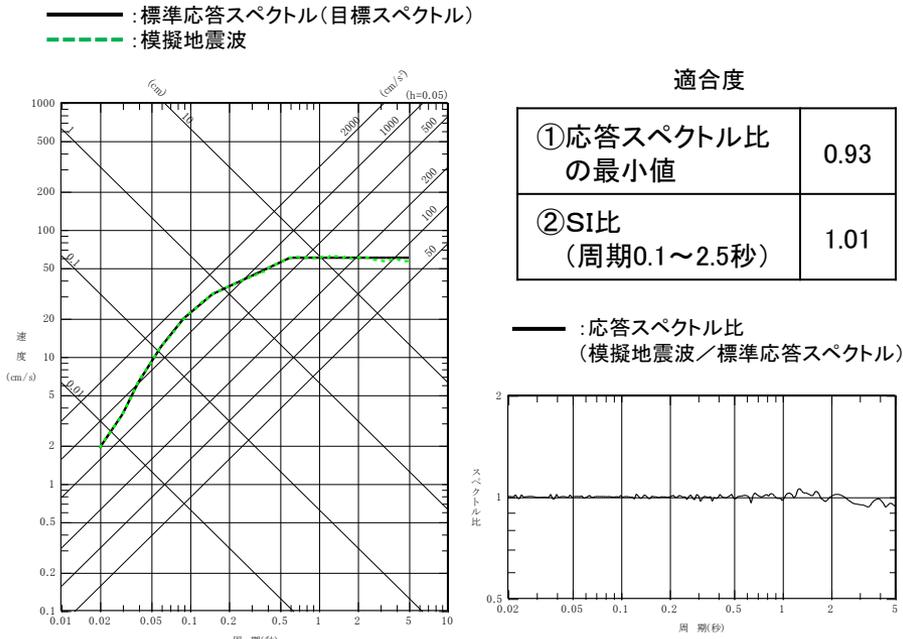
$$T_b = 10^{0.5M-2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M-1.0}$$

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

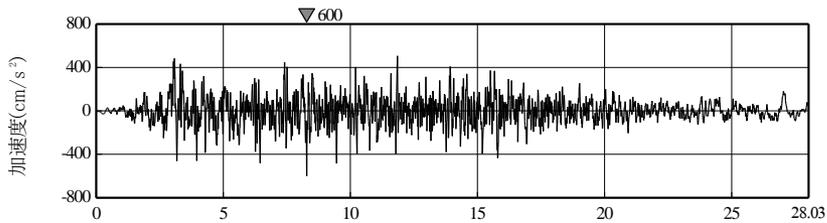
振幅包絡線の経時的変化

2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討 (3) 模擬地震波の作成結果



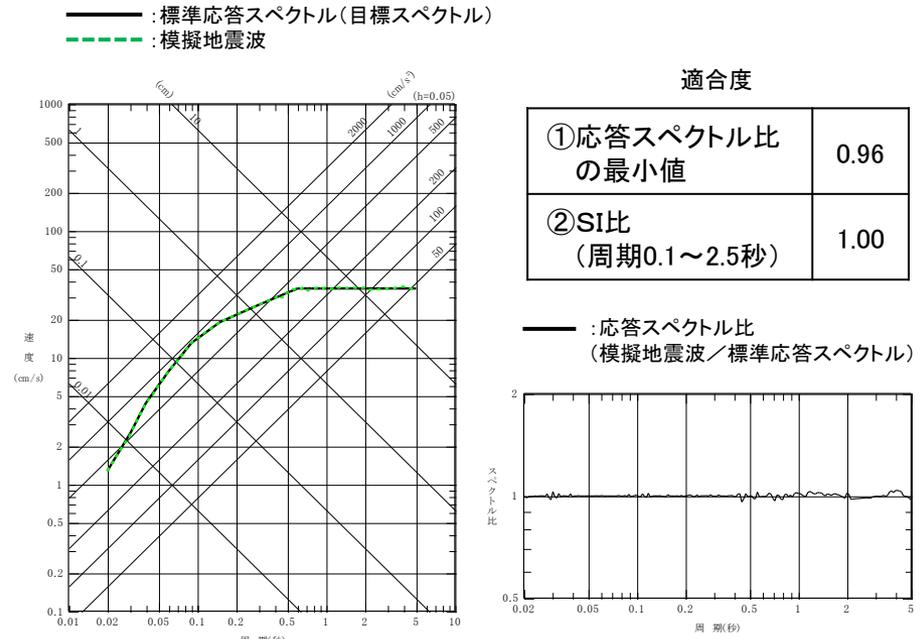
標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル

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



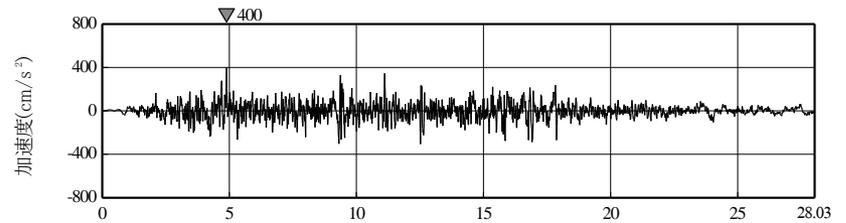
時間(秒)
加速度波形

水平方向



標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル

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



時間(秒)
加速度波形

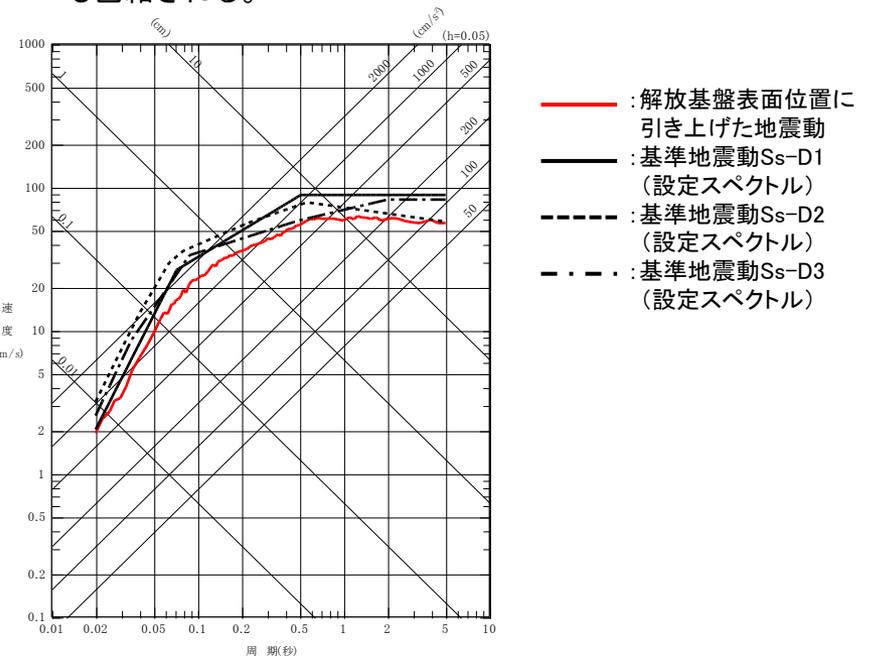
鉛直方向

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

2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討

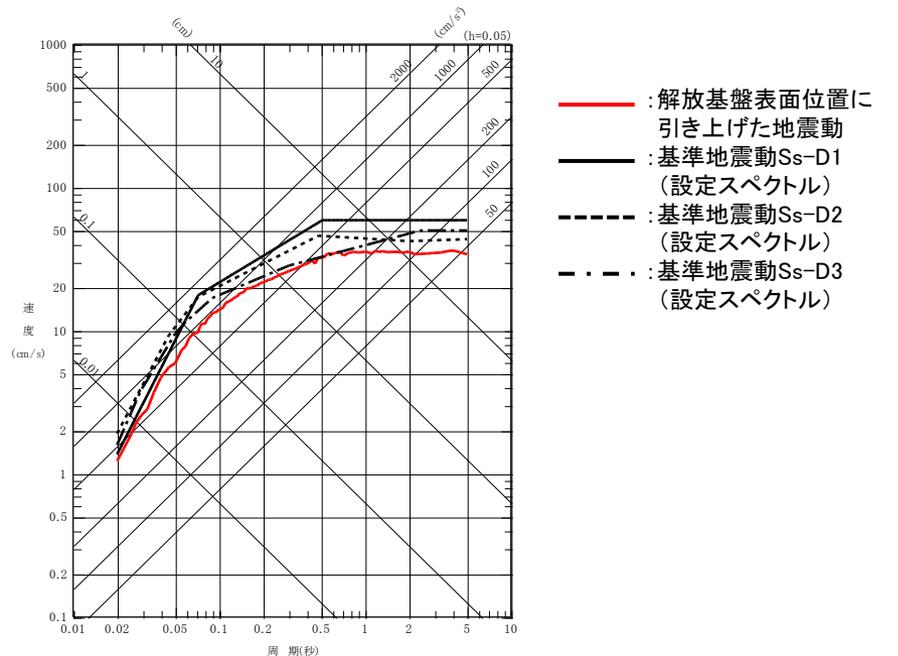
(4) 基準地震動との比較①

➤ 地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$)における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を地下構造モデルを用いて解放基盤表面位置 ($V_s=1500\text{m/s}$)に引き上げた地震動の応答スペクトルは、基準地震動Ss-D1に包絡される。なお、水平、鉛直とも基準地震動Ss-D2にも包絡される。



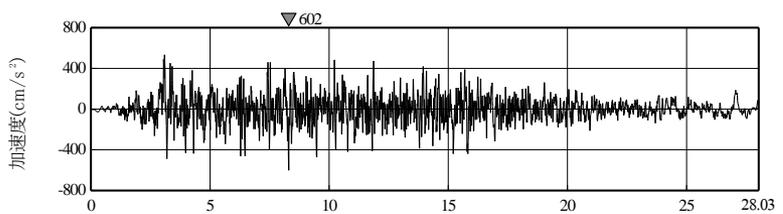
- (赤) : 解放基盤表面位置に引き上げた地震動
- (黒) : 基準地震動Ss-D1 (設定スペクトル)
- - - (黒) : 基準地震動Ss-D2 (設定スペクトル)
- · - · (黒) : 基準地震動Ss-D3 (設定スペクトル)

応答スペクトル(基準地震動Ss-D1~D3との比較)

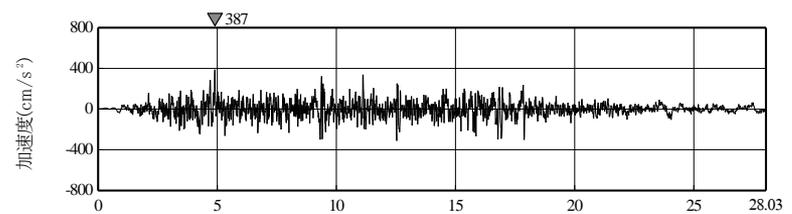


- (赤) : 解放基盤表面位置に引き上げた地震動
- (黒) : 基準地震動Ss-D1 (設定スペクトル)
- - - (黒) : 基準地震動Ss-D2 (設定スペクトル)
- · - · (黒) : 基準地震動Ss-D3 (設定スペクトル)

応答スペクトル(基準地震動Ss-D1~D3との比較)



時間(秒)
加速度波形
水平方向



時間(秒)
加速度波形
鉛直方向

標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を解放基盤表面位置 ($V_s=1500\text{m/s}$)に引き上げた地震動

2. 【補足検討1】標準応答スペクトルに適合した模擬地震波を用いた検討

(4) 基準地震動との比較②

➤ 地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$)における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を地下構造モデルを用いて解放基盤表面位置 ($V_s=1500\text{m/s}$)に引き上げた地震動の応答スペクトルは、基準地震動 $S_s\text{-D1}$ に包絡される。なお、水平、鉛直とも基準地震動 $S_s\text{-D2}$ にも包絡される。

➡ 以上の検討から地盤補正として基準地震動 $S_s\text{-D1}$ の応答スペクトル比を用いた評価結果は妥当であると判断する。

解放基盤表面位置に引き上げた地震動と基準地震動 $S_s\text{-D1}$, $S_s\text{-D2}$ 及び $S_s\text{-D3}$ の応答スペクトルの疑似速度(cm/s)

周期※1 (s)	水平方向 疑似速度(cm/s)					鉛直方向 疑似速度(cm/s)				
	標準応答 スペクトル	解放基盤の 地震動※2	$S_s\text{-D1}$ ※3	$S_s\text{-D2}$ ※3	$S_s\text{-D3}$ ※3	標準応答 スペクトル	解放基盤の 地震動※2	$S_s\text{-D1}$ ※3	$S_s\text{-D2}$ ※3	$S_s\text{-D3}$ ※3
0.02	1.910	1.922	2.0372	3.183	2.5465	1.273	1.231	1.3687	1.91	1.5915
0.03	3.500	3.488	4.6	7.4	6.1	2.500	2.625	3.1	4.2	4.0
0.04	6.300	6.468	8.2	13.2	10.4	4.400	4.723	5.5	7.3	6.5
0.06	12.000	13.258	18.4	26.6	18.9	7.800	8.112	12.3	13.5	11.7
0.09	20.000	21.822	30.4	37.9	33.7	13.000	13.205	20.3	19.3	16.9
0.15	31.000	31.539	41.6	47.5	39.8	19.000	18.956	27.8	25.2	21.1
0.30	43.000	43.582	63.8	62.8	49.9	26.000	25.941	42.6	36.1	28.4
0.60	60.000	59.860	88.4	77.7	61.4	35.000	34.369	59.0	45.4	34.3
5.00	60.000	56.303	88.4	57.5	82.0	35.000	34.122	59.0	43.5	50.0

※1: 周期は標準応答スペクトルのコントロールポイントを示す。 ※2: 解放基盤表面位置 ($V_s=1500\text{m/s}$)に引き上げた地震動の応答スペクトル
 ※3: 赤文字は基準地震動 $S_s\text{-D1}$, $S_s\text{-D2}$ 及び $S_s\text{-D3}$ のコントロールポイントを用いて両対数グラフでの線形補間により求めた値。

3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

(1) 検討の概要

【検討の目的】

基準地震動S_s-D1の応答スペクトル比を地盤補正として用いた検討の説明性向上のため、地震基盤相当面の観測点(O.P.-42.8m)と解放基盤表面の振動特性を代表する観測点(O.P.-8.6m)における観測記録を用いた検討を行う。

【検討の概要】

①地下構造モデルと観測記録の整合性の確認(応答スペクトルでの確認)

地盤補正に用いた統計的グリーン関数法の地下構造モデル(「**地下構造モデル2**」と呼称。)は、地震基盤相当面と解放基盤表面の振動特性を代表する位置を含む鉛直アレー観測で得られた観測記録に適合するように作成したはぎとり解析に用いる地下構造モデル(「**地下構造モデル1**」と呼称。)をベースとし、地盤減衰は強震動シミュレーション解析を踏まえて設定している。

地下構造モデル1が観測記録と整合していることを、平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」という。)において鉛直アレー観測で得られた観測記録を**地下構造モデル1**に入力し引き上げた地震動とそれに対応する観測点位置の観測記録の応答スペクトルの比較により確認する。

地下構造モデル1:鉛直アレー観測点間の伝達関数に適合するように、速度構造や地盤減衰を決定したモデル
〔はぎとり地下構造モデル、参考資料(p.30, p.41)参照〕

地下構造モデル2:地下構造モデル1の速度構造を用い、地盤減衰は強震動シミュレーションを踏まえて設定したモデル
〔統計的グリーン関数法(SGF)用地下構造モデル、p.6及び参考資料(p.31, p.46)参照〕

②はぎとり地下構造モデルを上昇計算に用いた場合の地震動評価

観測記録の伝達関数と整合する**地下構造モデル1**(はぎとり地下構造モデル)の場合、観測記録に含まれるインコヒーレントな成分の影響により、算定された地盤減衰は大きいものとなっている。そのため、応答スペクトル比の計算や標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を用いた検討では地盤減衰の小さい**地下構造モデル2**を用いているが、**地下構造モデル1**を使用した場合、算定される解放基盤表面における標準応答スペクトルがどの程度小さいものになるかを確認する。

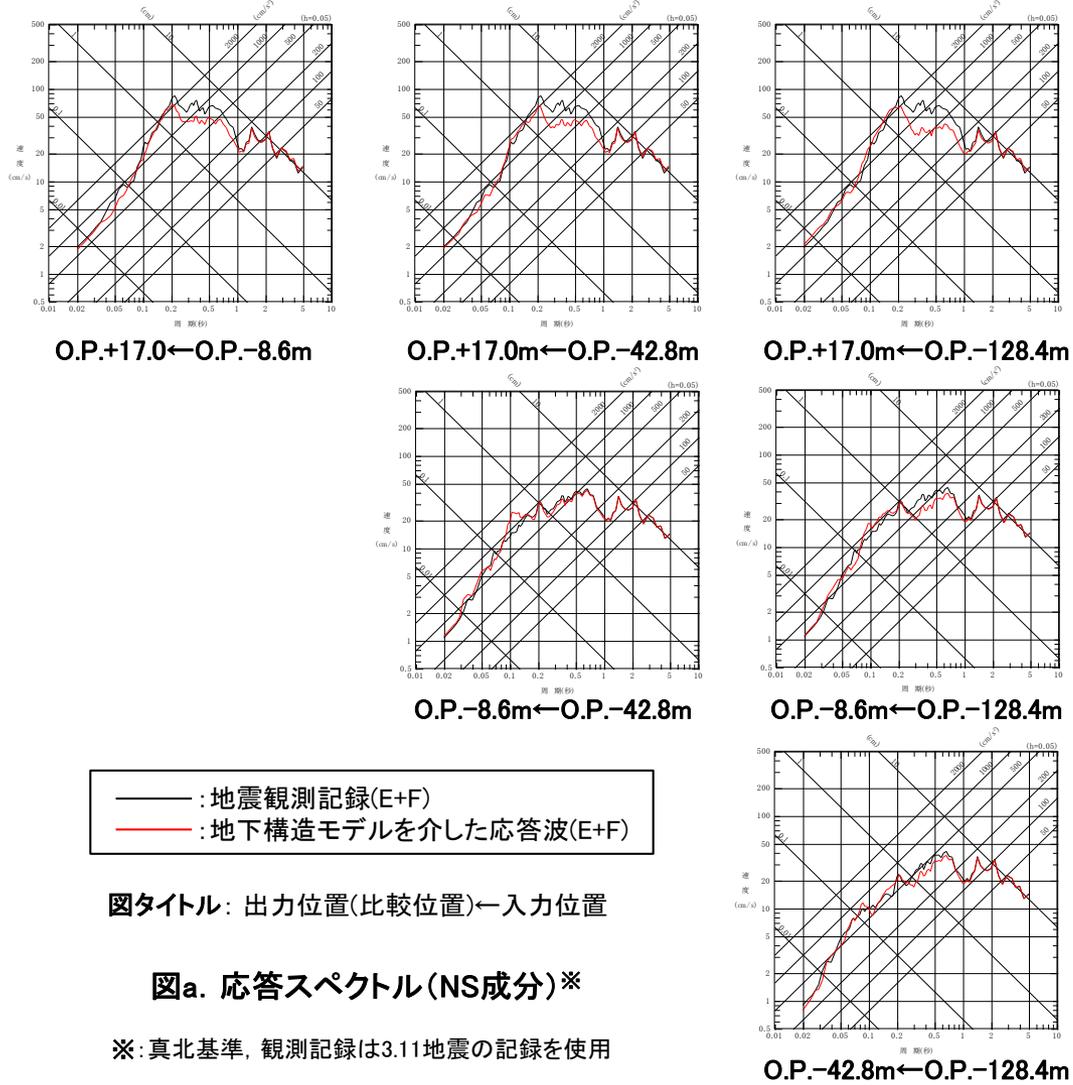
③観測記録の位相を用いた模擬地震波による検討

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いる。ガイド要求も踏まえ、標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を地震基盤相当面における観測記録の位相を用いて作成し、それを**地下構造モデル2**を用いて解放基盤表面まで引き上げた地震動と基準地震動との包絡関係が、一様乱数の位相を用いた模擬地震波による検討と整合することを確認する。

3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

(2) 地下構造モデルと観測記録の整合性の確認(応答スペクトルでの確認) ~NS成分~

- 自由地盤の鉛直アレイ観測で得られた観測記録を地下構造モデル1(はざとり地下構造モデル)に入力し引き上げた地震動の応答スペクトルは、図aに示すとおり各位置での観測記録の応答スペクトルと整合している。
- なお、参考に地震基盤相当面(O.P.-42.8m)と解放基盤表面位置(O.P.-8.6m)の観測記録の応答スペクトル比を地盤補正に用いたスペクトル比と合わせて図bに示す。両者の傾向は異なるが、これは観測記録に下降波や散乱波等の成分が含まれていることによる。

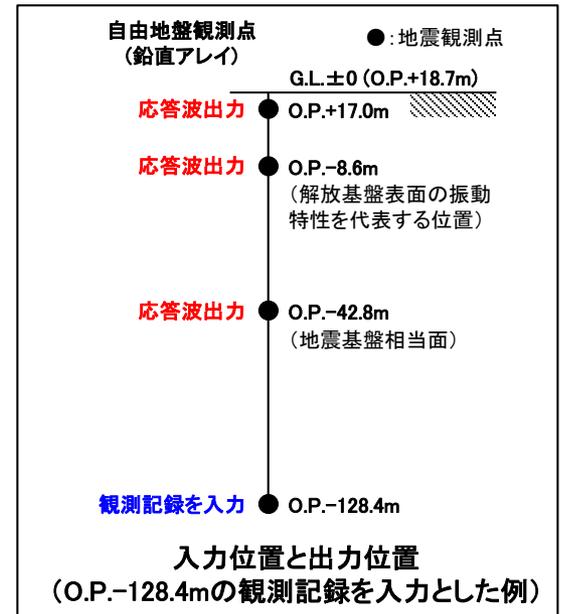


— : 地震観測記録(E+F)
 — : 地下構造モデルを介した応答波(E+F)

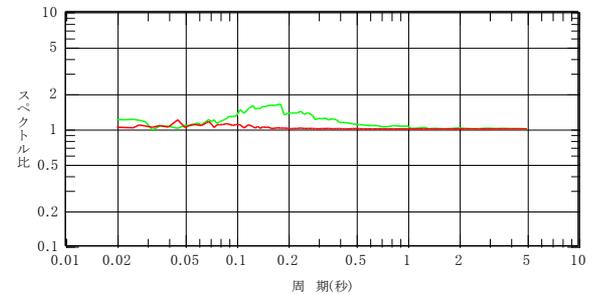
図タイトル: 出力位置(比較位置)←入力位置

図a. 応答スペクトル(NS成分)*

*: 真北基準, 観測記録は3.11地震の記録を使用



— : 観測記録(E+F)の応答スペクトル比
 — : 基準地震動Ss-D1による応答スペクトル比(水平方向)

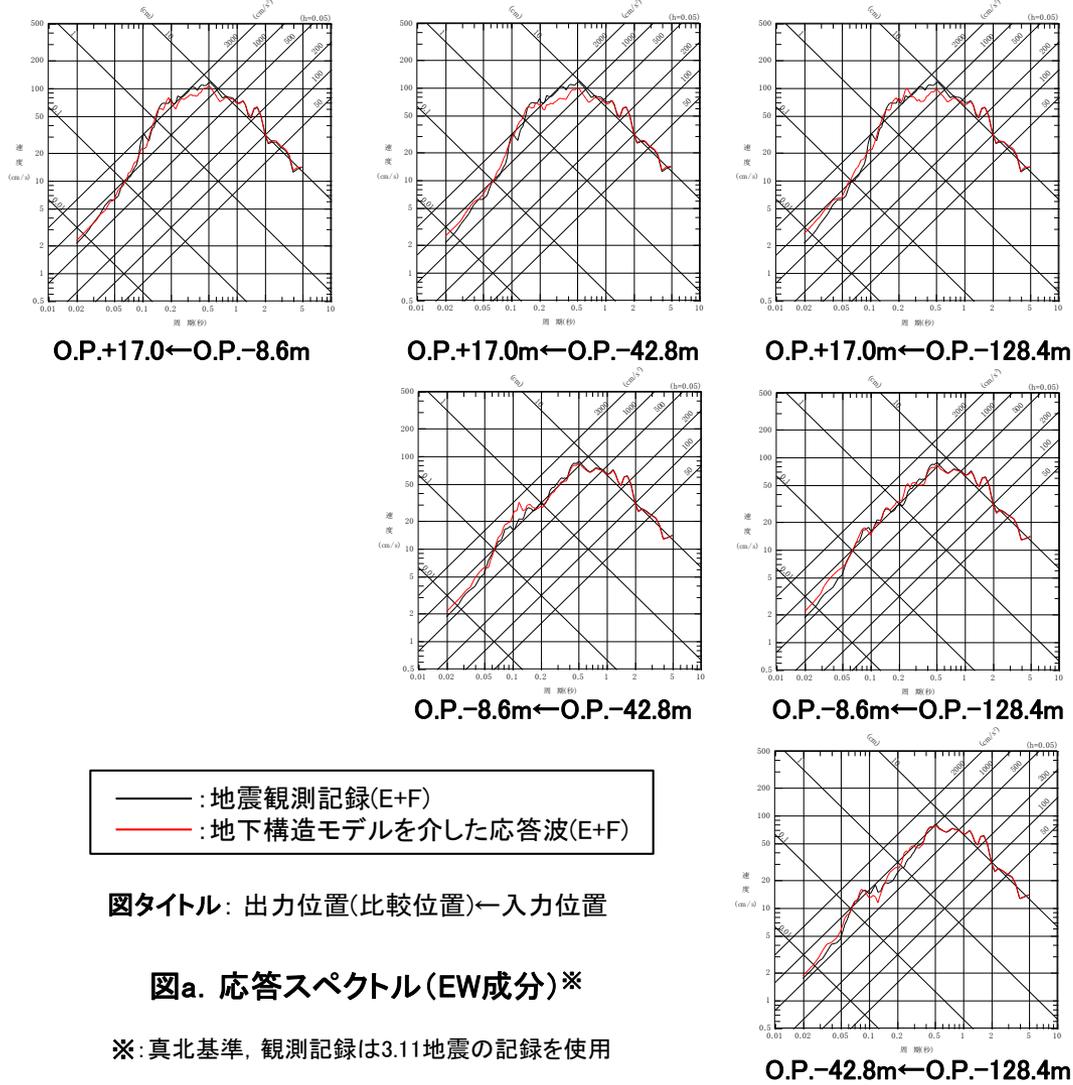


図b. 観測記録の応答スペクトル比(NS成分)
 (O.P.-8.6m/O.P.-42.8m)

3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

(2) 地下構造モデルと観測記録の整合性の確認(応答スペクトルでの確認) ~EW成分~

- 自由地盤の鉛直アレイ観測で得られた観測記録を地下構造モデル1(はざとり地下構造モデル)に入力し引き上げた地震動の応答スペクトルは、図aに示すとおり各位置での観測記録の応答スペクトルと整合している。
- なお、参考に地震基盤相当面(O.P.-42.8m)と解放基盤表面位置(O.P.-8.6m)の観測記録の応答スペクトル比を地盤補正に用いたスペクトル比と合わせて図bに示す。両者の傾向は異なるが、これは観測記録に下降波や散乱波等の成分が含まれていることによる。

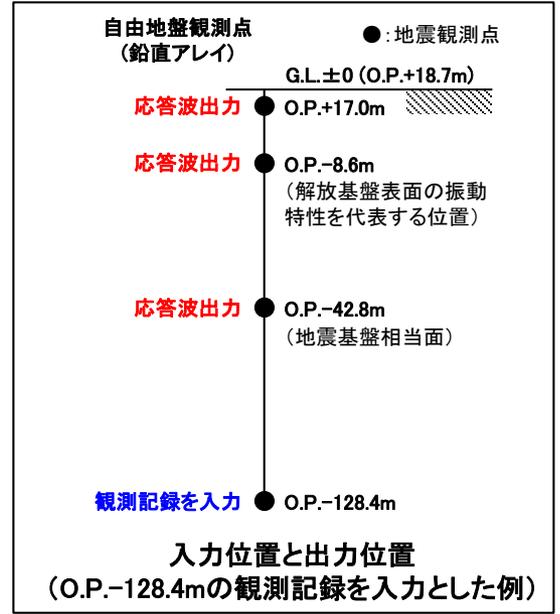


— : 地震観測記録(E+F)
 — : 地下構造モデルを介した応答波(E+F)

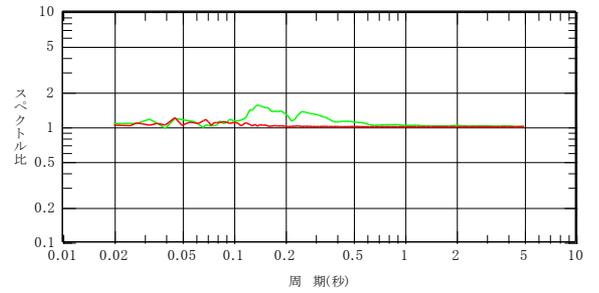
図タイトル: 出力位置(比較位置)←入力位置

図a. 応答スペクトル(EW成分)※

※: 真北基準, 観測記録は3.11地震の記録を使用



— : 観測記録(E+F)の応答スペクトル比
 — : 基準地震動Ss-D1による応答スペクトル比(水平方向)



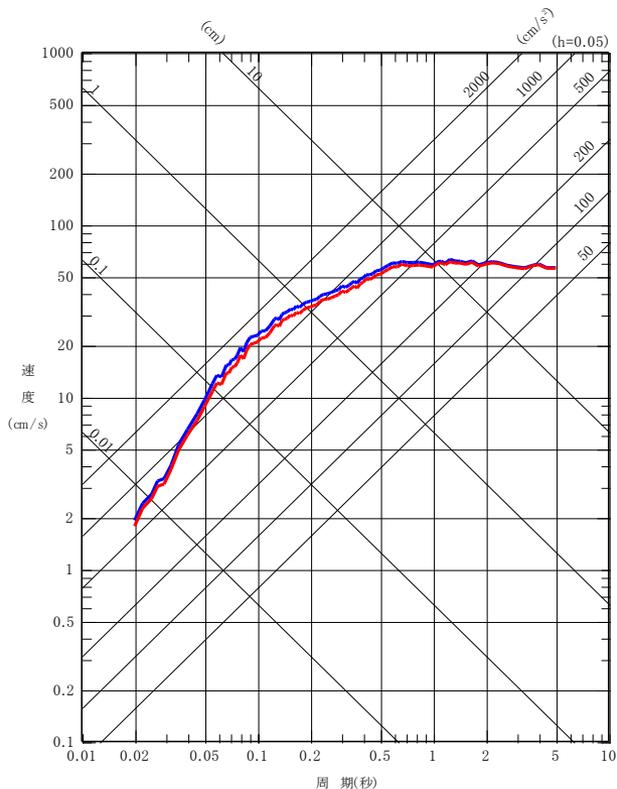
図b. 観測記録の応答スペクトル比(EW成分)
 (O.P.-8.6m/O.P.-42.8m)

3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

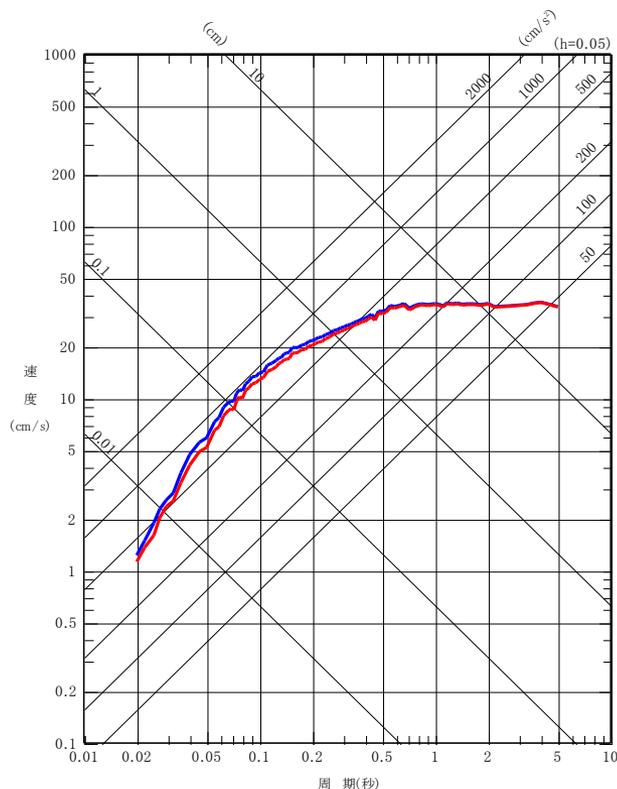
(3) 地下構造モデル1を上昇計算に用いた場合の地震動評価

➤ 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 (p.15参照) を解放基盤表面位置まで引き上げる計算 (【補足検討1】) には、地下構造モデル2 (SGF用地下構造モデル) を使用しているが、参考に地下構造モデル1 (はぎとり地下構造モデル) を使用した場合の引き上げ計算を行い、両者を比較した。観測記録と整合する地下構造モデル1の方が地盤減衰が大きいいため、引き上げ波も多少小さいものとなった。

- : 地下構造モデル1 (はぎとり地下構造モデル)
- : 地下構造モデル2 (SGF用地下構造モデル) (p.16再掲)



水平方向



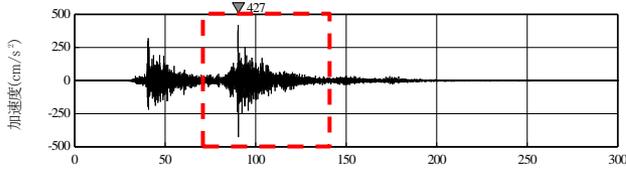
鉛直方向

地下構造モデル1と地下構造モデル2による上昇計算結果の比較 (O.P.-8.6m←O.P.-42.8m)

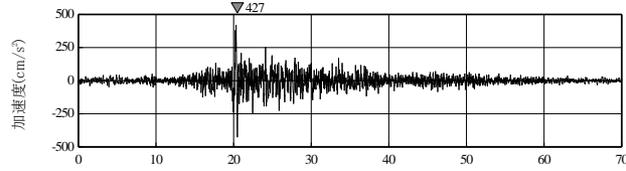
3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

(4) 観測記録の位相を用いた模擬地震波による検討① ～模擬地震波の作成概要～

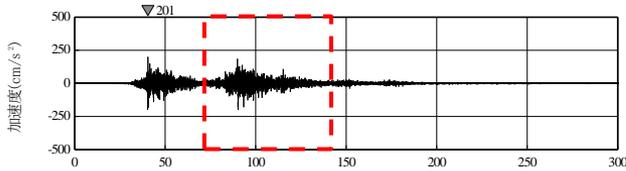
▶ 女川原子力発電所では敷地近傍における内陸地殻内地震の観測記録は得られていないこと、また、模擬地震波の作成に当たっては継続時間の長い観測記録を用いた方が目標スペクトルに適合する波を作成しやすいことから、模擬地震波作成に使用する観測記録としては、3.11地震の後半の波群(70秒間)を使用する。



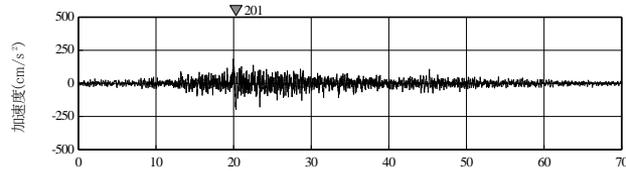
NS成分 全区間



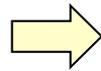
NS成分 70秒～140秒



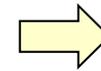
UD成分 全区間



UD成分 70秒～140秒



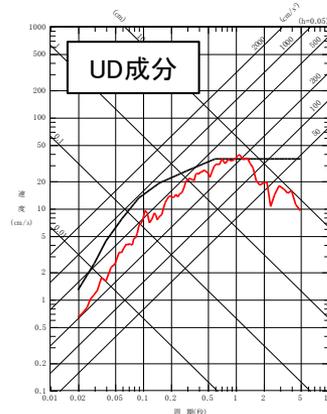
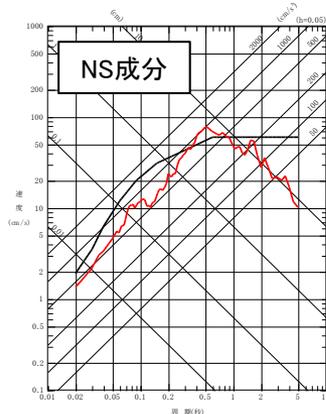
波形
切り出し



標準応答スペクトルに
適合するように作成

3.11地震の観測記録及び模擬地震波の作成に使用する波群(O.P.-42.8m:地震基盤相当面) 加速度波形

— : 観測記録 70秒～140秒
— : 標準応答スペクトル



模擬地震波の作成に使用する波群(O.P.-42.8m:地震基盤相当面) 応答スペクトル

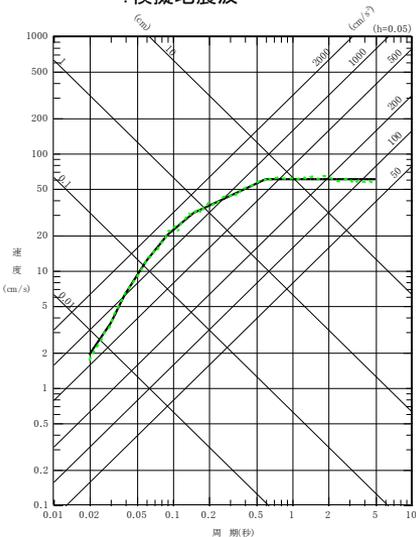
3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

(4) 観測記録の位相を用いた模擬地震波による検討② ～模擬地震波の作成結果～

▶ 模擬地震波は、観測記録の位相特性を用い目標スペクトルと適合※するようにフーリエ振幅を修正することにより作成した。なお、作成した模擬地震波は一樣乱数の位相特性を持つ模擬地震波に比べ、フィッティングのばらつきが多少大きい結果となった。

※:適合度は、一樣乱数の位相特性を持つ正弦波の重ね合わせによって作成する模擬地震波と同じく、原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-2015(日本電気協会, 2016)に基づき判定(p.13参照)。

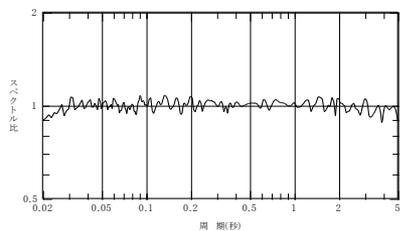
— : 標準応答スペクトル(目標スペクトル)
- - - : 模擬地震波



適合度

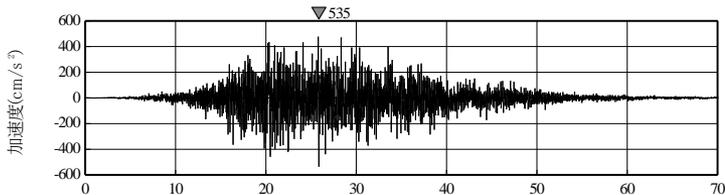
① 応答スペクトル 最小比	0.88
② SI比 (周期0.1~2.5秒)	1.01

— : 応答スペクトル比
(模擬地震波/標準応答スペクトル)



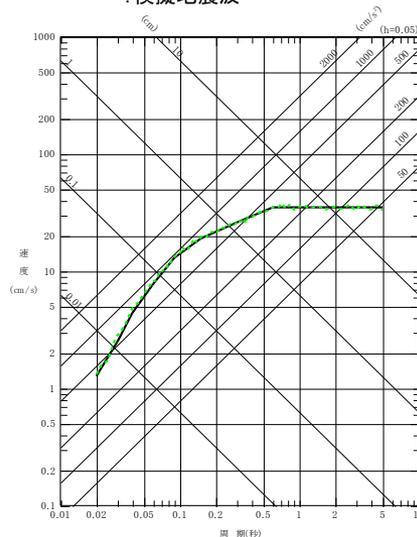
標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル

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



時間(秒)
加速度波形
水平方向

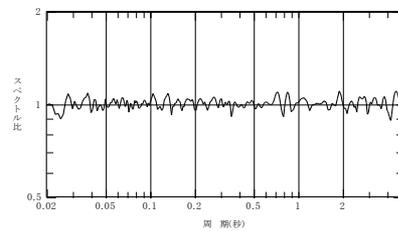
— : 標準応答スペクトル(目標スペクトル)
- - - : 模擬地震波



適合度

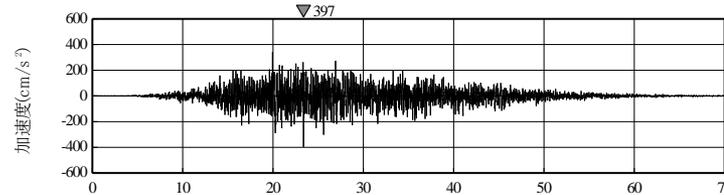
① 応答スペクトル 最小比	0.89
② SI比 (周期0.1~2.5秒)	1.00

— : 応答スペクトル比
(模擬地震波/標準応答スペクトル)



標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル

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



時間(秒)
加速度波形
鉛直方向

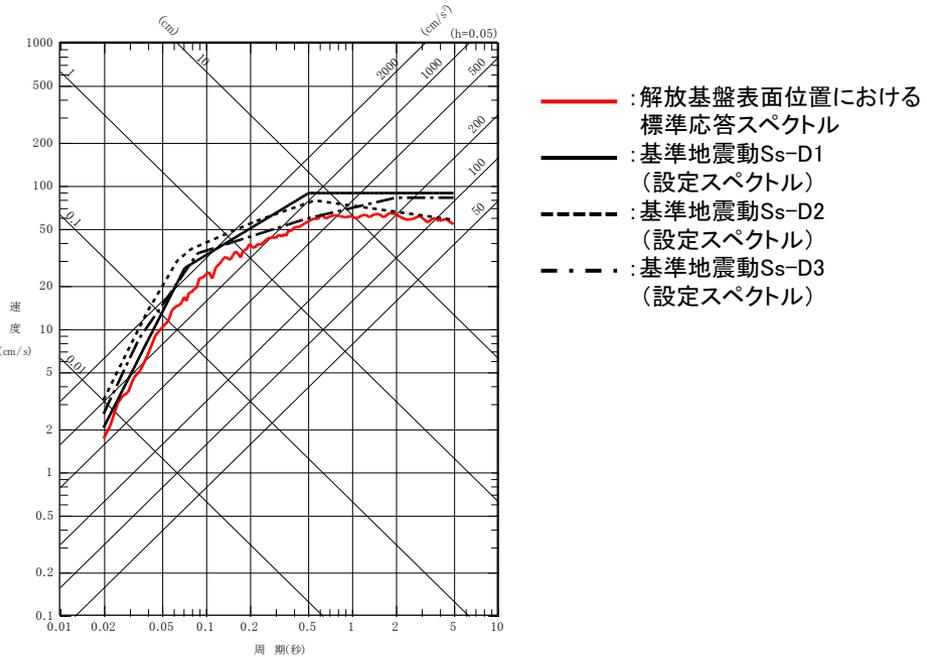
観測記録の位相を用いた地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波

3. 【補足検討2】地震観測記録を用いた検討

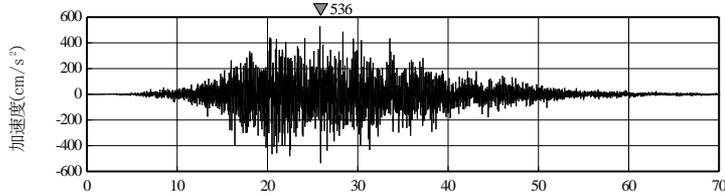
(4) 観測記録の位相を用いた模擬地震波による検討③ ～基準地震動との比較～

➤ 作成した模擬地震波を地下構造モデル2 (SGF用地下構造モデル)を用いて解放基盤表面位置 ($V_s=1500\text{m/s}$)に引き上げた地震動の応答スペクトルは、基準地震動 $S_s\text{-D1}$ に包絡される。なお、水平、鉛直とも $S_s\text{-D2}$ にも包絡される。

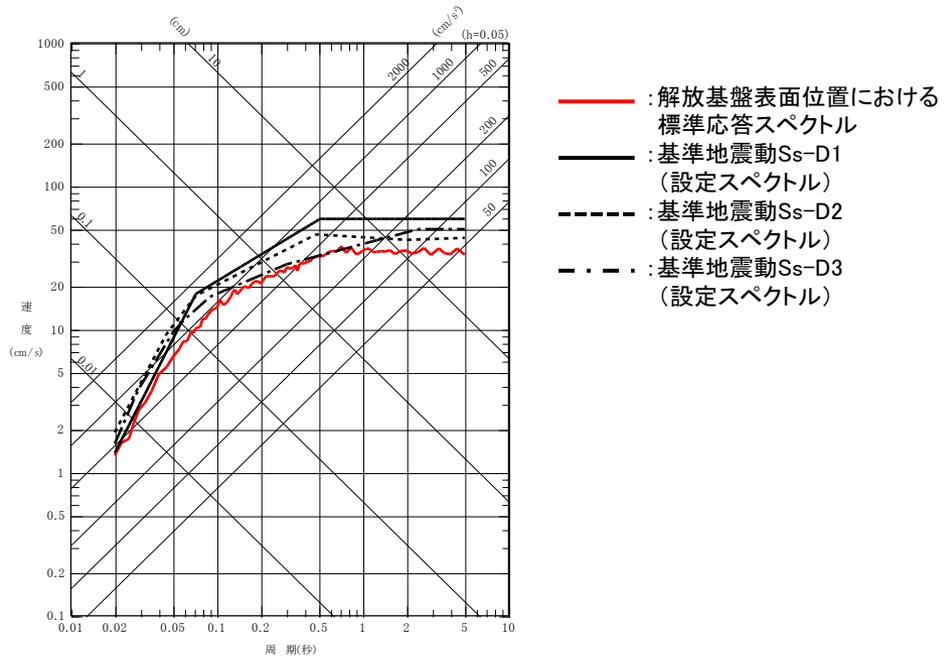
➡ 観測記録の位相を用い所定の適合度を有する模擬地震波による検討結果は、一様乱数の位相を用いた検討(p.16)と整合する。



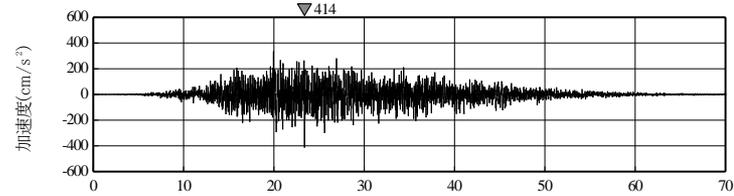
応答スペクトル(基準地震動 $S_s\text{-D1}$ ~ $S_s\text{-D3}$ との比較)



時間(秒)
加速度波形
水平方向



応答スペクトル(基準地震動 $S_s\text{-D1}$ ~ $S_s\text{-D3}$ との比較)



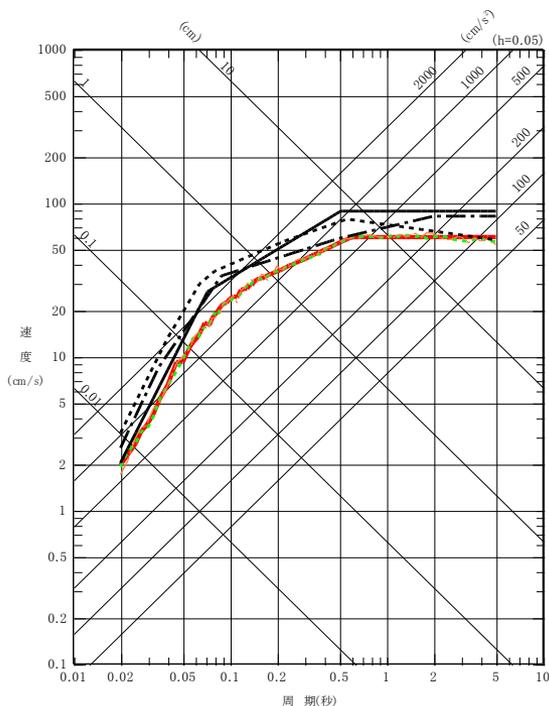
時間(秒)
加速度波形
鉛直方向

観測記録の位相を用いた標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を解放基盤表面位置 ($V_s=1500\text{m/s}$)に引き上げた地震動

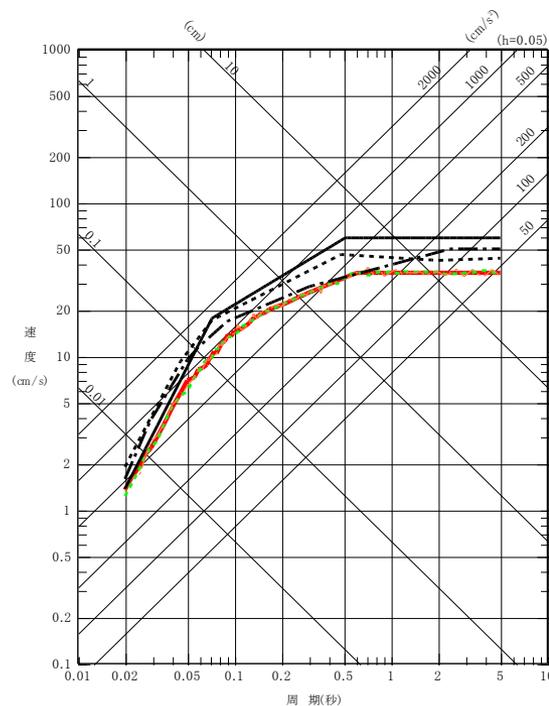
4. 各種方法で求めた解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動S_s-D1, S_s-D2及びS_s-D3との比較

➤ 地盤補正として基準地震動S_s-D1の応答スペクトル比を用いた解放基盤表面位置における標準応答スペクトル (p.8参照) 及び模擬地震波を用いた解放基盤表面位置における標準応答スペクトル (p.16, p.24参照) を基準地震動S_s-D1~D3(設定スペクトル)と合わせて示す。

- : 地盤補正として基準地震動S_s-D1の応答スペクトル比を用いた解放基盤表面位置における標準応答スペクトル
- - - : 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(一様乱数位相)を用いた解放基盤表面位置における標準応答スペクトル
- - · - : 標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(観測記録位相)を用いた解放基盤表面位置における標準応答スペクトル
- : 基準地震動S_s-D1(設定スペクトル)
- - - : 基準地震動S_s-D2(設定スペクトル)
- - · - : 基準地震動S_s-D3(設定スペクトル)



水平方向



鉛直方向

解放基盤表面位置における標準応答スペクトルと基準地震動S_s-D1~D3(設定スペクトル)

参考資料

1. 発電用原子炉設置変更許可申請書(抜粋)

(添付書類六 5. 地震より)

5.4 敷地地盤の振動特性

5.4.1 敷地地盤の速度構造

「3. 地盤」に示すとおり、試掘坑内における屈折法による弾性波試験の結果、S波速度は平均約 1.4 km/s である。また、炉心直交断面において実施した複数のP S検層結果の速度層境界の深さを地質を考慮して結ぶと、敷地地盤全体の速度層構造は概ね水平な成層構造をなす5層に区分され、原子炉建屋の設置レベルに位置する第3速度層のS波速度は1.5km/sである。

5.4.2 地震観測

(1) 敷地地盤で観測された主な地震

敷地地盤では、第 5.4-1 図に示す自由地盤で地震観測を実施している。観測された主な地震の諸元を第 5.4-1 表に、震央分布を第 5.4-2 図に示す。これらの地震について、岩盤上部の地震観測点 (0.P. -8.6m) で得られた観測記録の応答スペクトルを第 5.4-3 図に示す。

また、2011 年東北地方太平洋沖地震について、岩盤内の各深さで得られた観測記録の応答スペクトルを第 5.4-4 図に示す。同図によると、岩盤内で著しい増幅は認められない。

(2) 地震波の到来方向の違いによる増幅特性

敷地では、第 5.4-1 図に示す自由地盤観測点のほか、原子炉建屋直下の地盤においても地震観測を実施している。敷地で観測された中小地震の観測記録を用いて、地震波の到来方向別の増幅特性の検討を行った。検討に用いた地震の震央分布図を第 5.4-5 図に示す。深部で観測を行っている各観測点の鉛直アレイ、自由地盤観測点を基準とした深部及び浅部の水平アレイについて、応答スペクトル比による検討を行った結果を第 5.4-6 図及び第 5.4-7 図に示す。各観測点とも地震波の到来方向の違いによる特異な増幅特性は認められず、また各観測点の振動特性の違いは小さい。

5.4.3 解放基盤表面の設定

「3. 地盤」に示すとおり、敷地周辺には中生界ジュラ系の砂岩、頁岩等が広く分布し、原子炉建屋基礎地盤の大部分は、著しい風化を受けていないC_M級以上の岩盤から構成されている。その速度層構造は、炉心直交断面において実施したP S検層結果から、S波速度が 0.7km/s 以上の硬質岩盤で、概ね水平な成層構造をなして相当な広がりをもって分布しており、原子炉建屋の設置レベルに位置する第3速度層のS波速度は1.5km/sとなっている。以上のことから、解放基盤表面は、この岩盤が分布する原子炉建屋の設置位置である0.P. -14.1mに設定する。

また、「5.4.2 地震観測」に示すように、敷地では岩盤内における観測記録の著しい増幅特性は認められないこと、また、地震波の到来方向の違いによる特異な増幅特性は認められず、場所の違いによる振動特性の違いも小さいことから、解放基盤表面の地震動特性は、自由地盤における岩盤上部の地震観測点位置 (0.P. -8.6m) で代表する。

5.4.4 地下構造モデル

敷地地盤の速度層構造は概ね水平な成層構造であることから、敷地の地下構造モデルは一次元モデルとした。

はざとり解析に用いる地下構造モデルを第 5.4-2 表に、統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルを第 5.4-3 表に、ハイブリッド合成法のうち理論的手法に用いる地下構造モデルを第 5.4-4 表に示す。

はざとり解析に用いる地下構造モデルは、ボーリング調査結果に基づき初期値を設定し、敷地における中小地震の地震観測記録を用いて各層の層厚、速度及び減衰を最適化した。さらに岩盤より浅い表層部分について 2003 年宮城県沖の地震及び 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震記録を用いて設定したモデルを採用した。2011 年東北地方太平洋沖地震の敷地における観測記録の伝達関数とはざとり解析に用いる地下構造モデルの伝達関数の比較を第 5.4-8 図に示す。

統計的グリーン関数法⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾に用いる地下構造モデルは、統計的グリーン関数法の地震基盤波を入力する位置（以下、「地震基盤」といい、敷地においては 0.P. -128.4m とする。）から解放基盤表面までの層厚及び速度をはざとり解析に用いる地下構造モデルとし、減衰を 2003 年宮城県沖の地震及び 2005 年宮城県沖の地震のシミュレーション解析⁽³⁷⁾で敷地の観測記録との整合を確認して設定したモデルを採用した。この地下構造モデルは、2011 年東北地方太平洋沖地震及び 2011 年 4 月 7 日宮城県沖の地震についてもシミュレーション解析⁽³⁸⁾を実施し、敷地の観測記録との整合を確認した。諸井ほか（2013）⁽³⁹⁾の断層モデルを用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震の統計的グリーン関数法によるシミュレーション解析結果と敷地における観測記録との比較を第 5.4-9 図に示す。

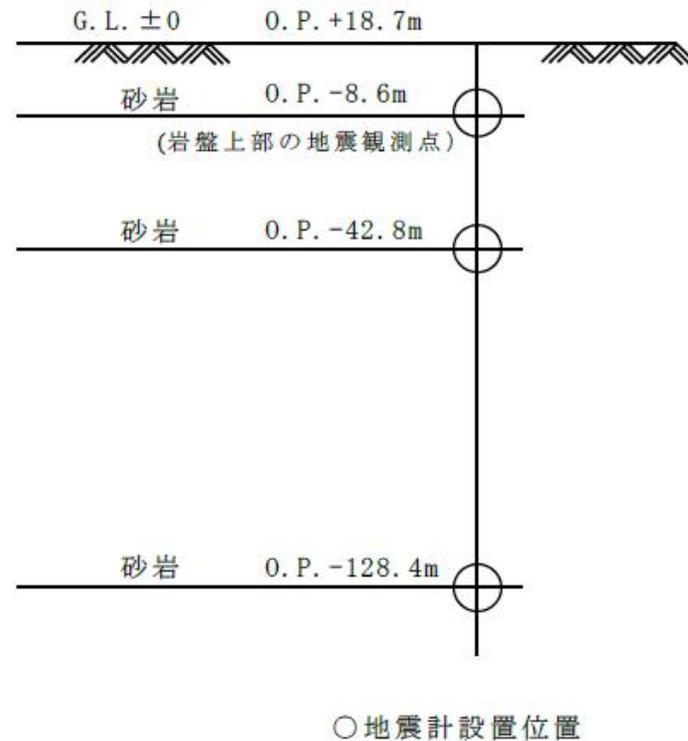
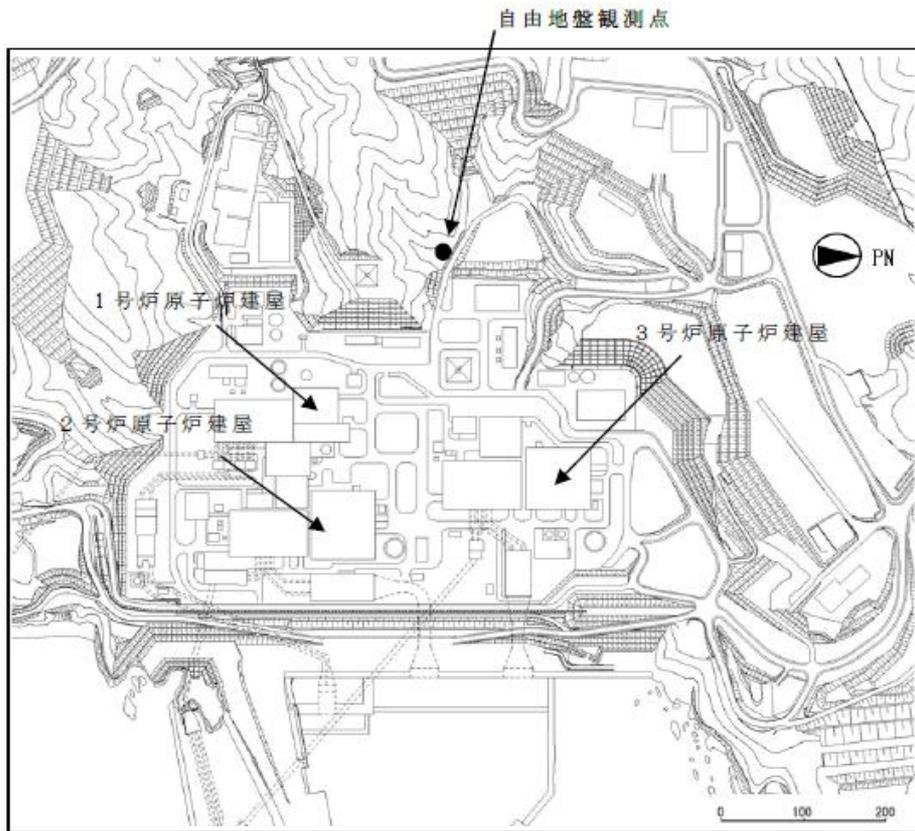
理論的手法に用いる地下構造モデルの 0.P. -128.4m 以浅の浅部地下構造

は、統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの層厚及び速度とし、減衰を防災科学技術研究所（2012）⁽⁴⁰⁾に基づき設定した。0.P. -128.4m 以深の深部地下構造は、防災科学技術研究所（2012）及び地震調査研究推進本部（2012b）⁽⁴¹⁾に基づき設定した。設定した地下構造モデルは、敷地における観測記録と理論波形との比較により検証を行った。検証に用いた地震は、地下構造モデルの適用を考慮し、敷地周辺で発生した内陸地殻内地震のうち長周期成分を比較的含み震源メカニズムが明らかな地震を選定し、2003 年 8 月 8 日宮城県北部の地震（M4.6）、2012 年 10 月 1 日宮城県沖の地震（M4.6）及び 2014 年 2 月 12 日金華山の地震（M4.2）を採用した。

5.5 基準地震動 S_s

基準地震動 S_s は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、敷地の解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定する。

なお、水平方向の 2 成分は、施設の配置を考慮してプラントノースを基準とする。



第 5.4-1 図 敷地地盤における地震観測点 (自由地盤観測点)

第 5.4-2 表 はぎとり解析に用いる地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	減衰定数 $h(f)=h_0 f^{-\alpha}$			
G. L. (m)	O. P. (m)					水平		鉛直	
						h ₀	α	h ₀	α
0	18.7								
-1.7	17.0	1.7	2.10	204 (112)	467	0.10 (0.44)	0.00 (0.38)	0.50	0.51
-5.0	13.7	3.3							
-21.6	-2.9	16.6							
-27.3	-8.6	5.7	2.55	1500	2882	0.20	1.00	0.62	0.62
-34.5	-15.8	7.2							
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	1.00	0.87	1.00	0.61
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	0.77	1.00		
-147.1	-128.4	65.3							
-	-	∞		2600	5300				

※括弧内の数値は，2011年東北地方太平洋沖地震の解析に使用。

第 5.4-3 表 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)	V _p (m/s)	減衰 (%)
G. L. (m)	O. P. (m)					
-27.3	-8.6					
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882	3.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	
-147.1	-128.4	65.3		2600	5300	
-	-	∞	2.68	3000	-	※

※プレート間地震，内陸地殻内地震

$$Q(f) = 110 \cdot f^{0.69} \quad (f \geq 1 \text{ Hz}), \quad 110 \quad (f < 1 \text{ Hz})$$

[地震調査研究推進本部 (2005) ⁽³²⁾による]

海洋プレート内地震

$$Q(f) = 114 \cdot f^{0.92} \quad [\text{佐藤 (2004) } ^{(33)} \text{による}]$$

参考資料

2. 新規制基準適合性に係る審査会合資料(抜粋)

令和元年11月19日 女川原子力発電所2号炉の新規制基準適合性審査に関する面談(資料提供・まとめ資料再修正版提出)について
資料8:資料1-4-1 女川原子力発電所2号炉基準地震動の策定について(令和元年9月27日審査会合資料一部修正)より

ただし、p.39~40については、

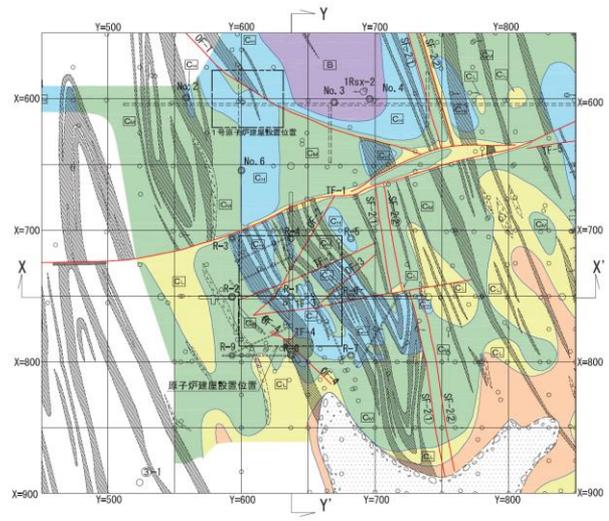
平成26年8月1日 第128回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合

資料2-2:女川原子力発電所 敷地の地質・地質構造及び地盤の振動特性について(補足説明資料) より

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

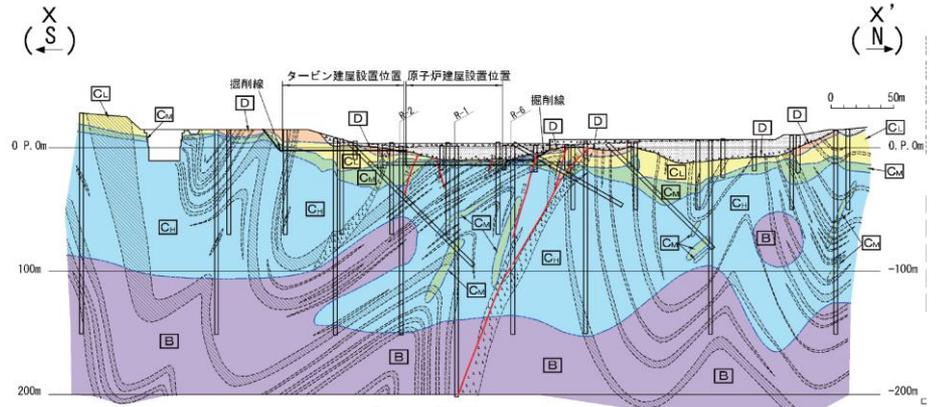
2.1 敷地周辺の地質・地質構造 2号炉原子炉建屋基礎地盤の工学的特性[岩盤分類]

- 岩盤分類の結果，基礎地盤は工学的には概ね成層構造をなしている。
- 原子炉建屋基礎地盤の大部分は C_M 級以上から構成されている。

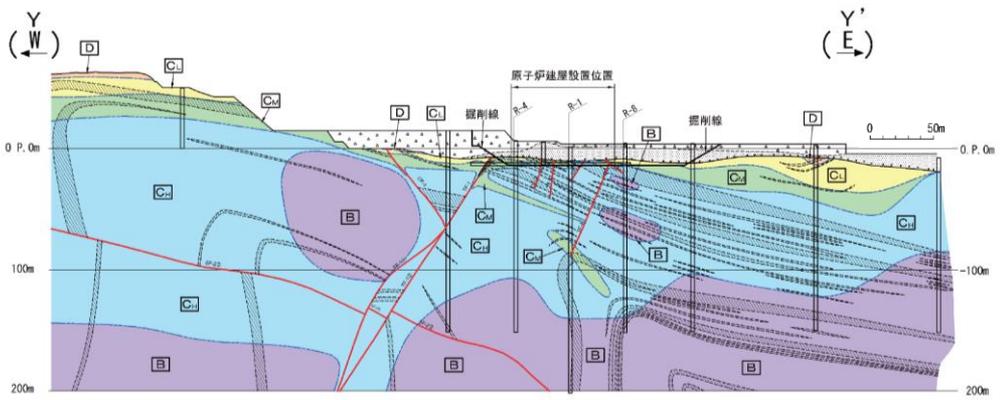


岩盤分類図(O.P.約-14m)

- 凡 例
- 岩盤分類
 - B 級
 - C_M 級
 - C_L 級
 - C_S 級
 - D 級
 - 岩盤分類境界
 - 盛 土
 - 第四系(砂礫)
 - 砂 岩
 - 頁 岩
 - ひ ん 岩
 - 地 質 境 界
 - 断 層
 - 炉心ボーリング位置
 - ボーリング位置
 - 水平ボーリング
 - 試験坑(1, 3号炉関連)
 - *矢印は斜めボーリングの掘削方向を示す



岩盤分類図(X-X')

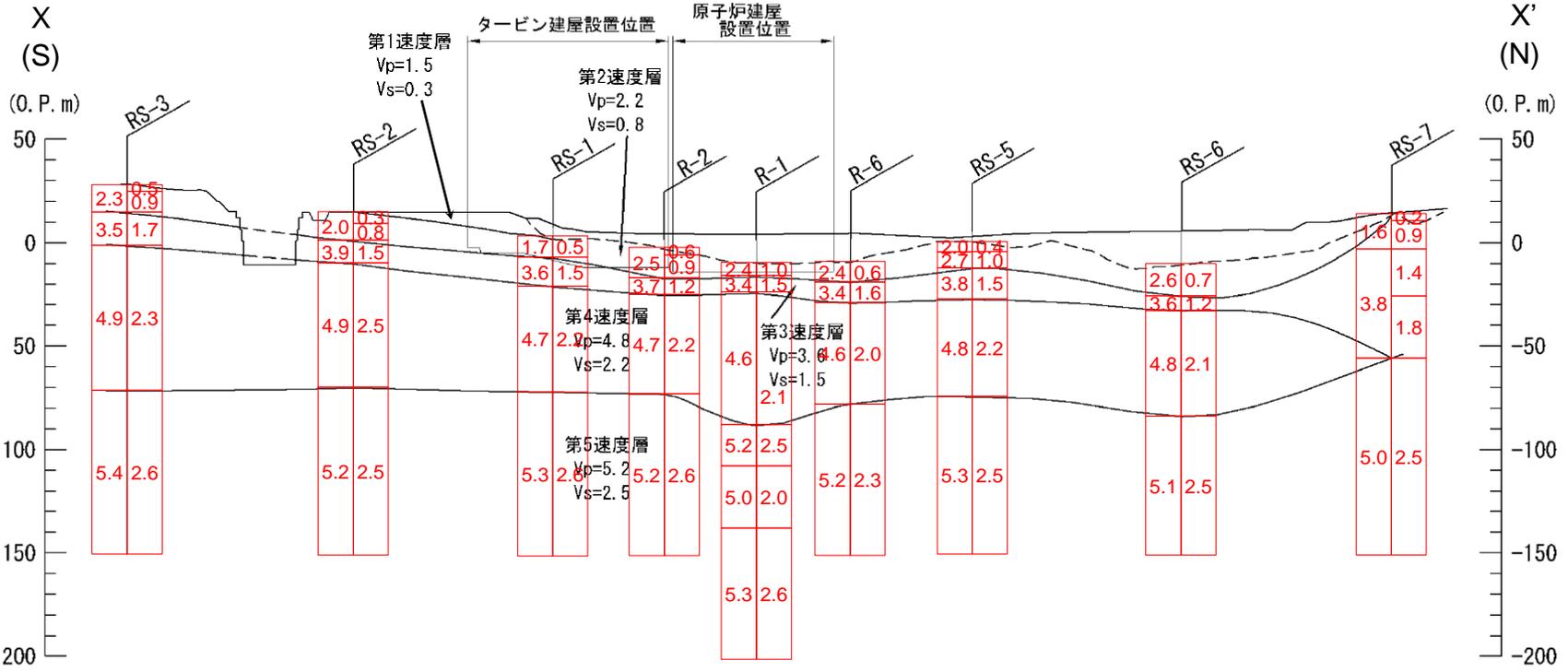


岩盤分類図(Y-Y')

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.1 敷地周辺の地質・地質構造 2号炉原子炉建屋基礎地盤の工学的特性[速度構造]

- 原子炉建屋基礎地盤の速度層構造については、概ね水平な成層構造をなす5層に区分される。
- 速度層境界については、局所的なゆらぎはあるものの各ボーリング孔の全体的な傾向をみて区分し、各孔の深度をなめらかに結んでいる。



凡 例

-----: 盛土及び旧表土と岩盤の境界線

速度層区分図(X-X')

単位 km/sec

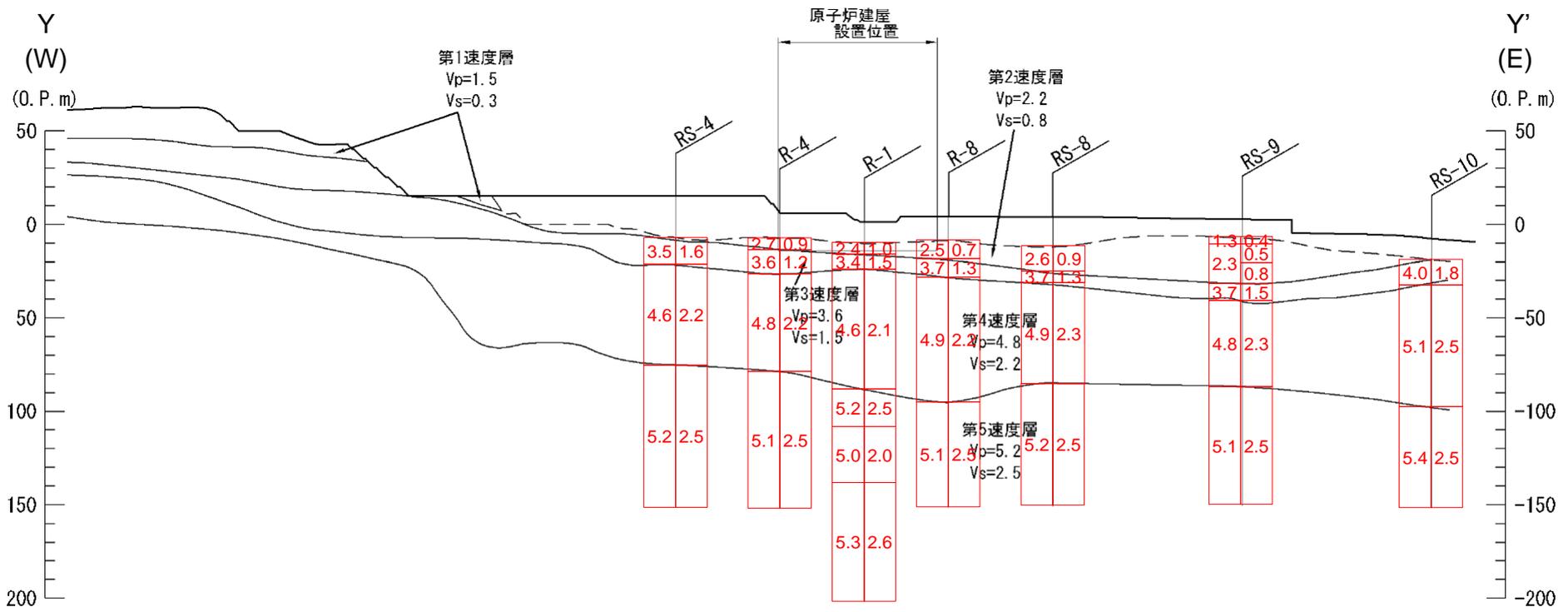


V _P (km/s)	V _S (km/s)
--------------------------	--------------------------

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.1 敷地周辺の地質・地質構造 2号炉原子炉建屋基礎地盤の工学的特性[速度構造]

- 原子炉建屋基礎地盤の速度層構造については、概ね水平な成層構造をなす5層に区分される。
- 速度層境界については、局所的なゆらぎはあるものの各ボーリング孔の全体的な傾向をみて区分し、各孔の深度をなめらかに結んでいる。



凡 例

-----: 盛土及び旧表土と岩盤の境界線

速度層区分図(Y-Y')

単位 km/sec

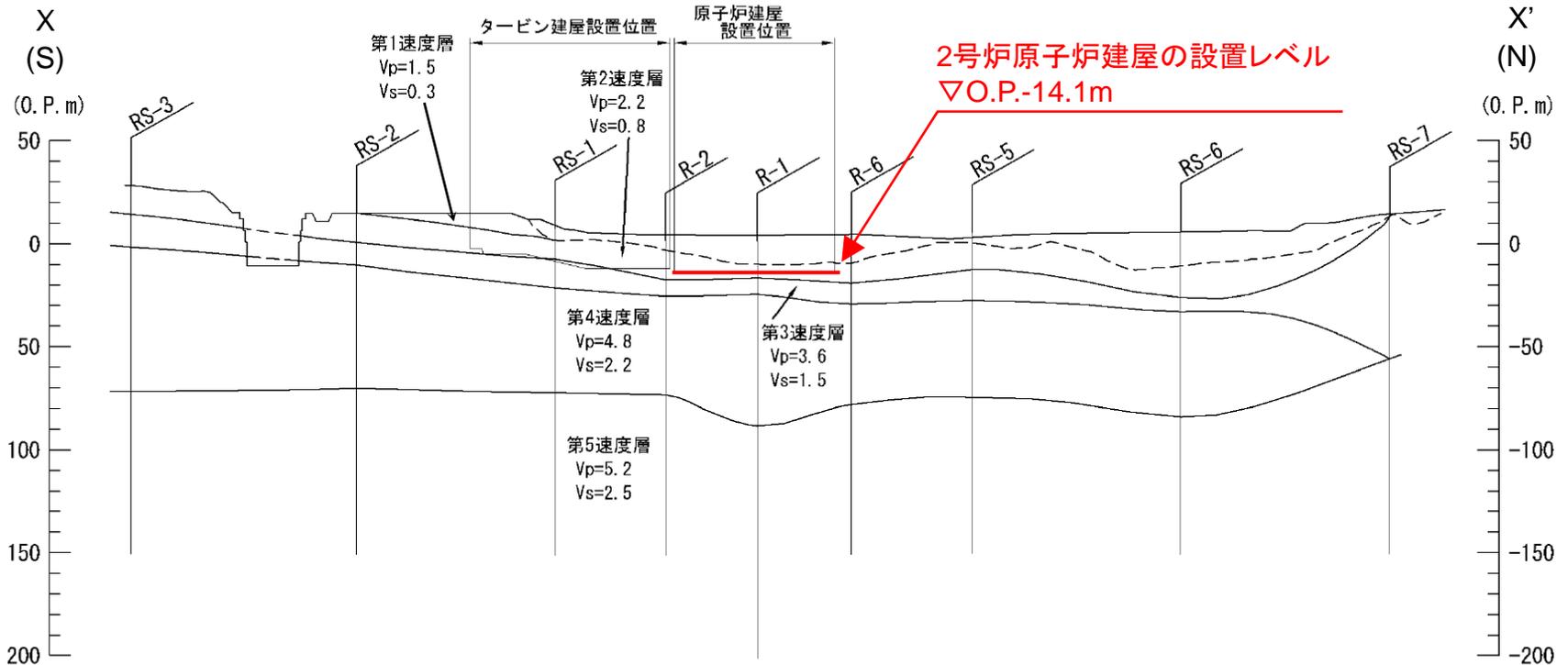


V _P (km/s)	V _S (km/s)
--------------------------	--------------------------

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.2 解放基盤表面の要求事項と設定 2号炉原子炉建屋設置レベル(1)

- 解放基盤表面の位置は、原子炉建屋が設置する岩盤とする。
- 2号炉原子炉建屋の設置レベルは、O.P.-14.1mである。



凡 例

-----: 盛土及び旧表土と岩盤の境界線

単位 km/sec

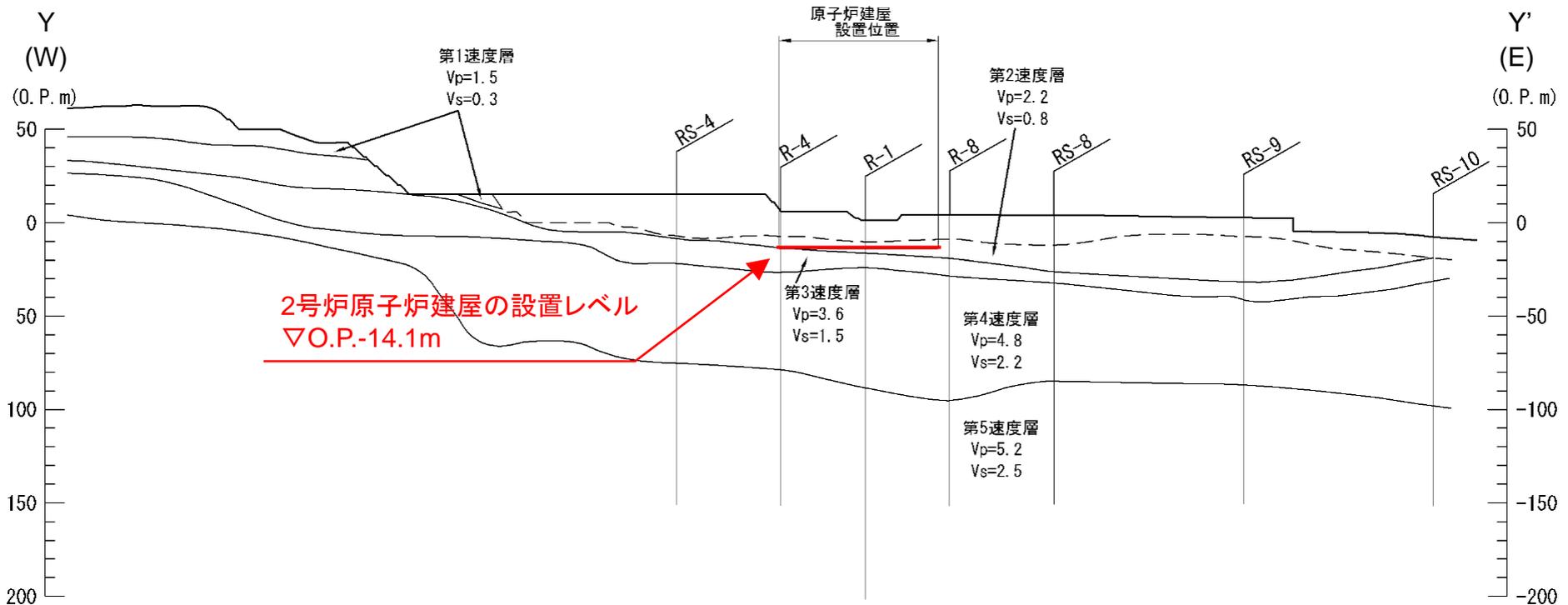


速度層区分図(X-X')と2号炉原子炉建屋の設置レベル

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.2 解放基盤表面の要求事項と設定 2号炉原子炉建屋設置レベル(2)

- 解放基盤表面の位置は、原子炉建屋が設置する岩盤とする。
- 2号炉原子炉建屋の設置レベルは、O.P.-14.1mである。



凡 例

-----: 盛土及び旧表土と岩盤の境界線

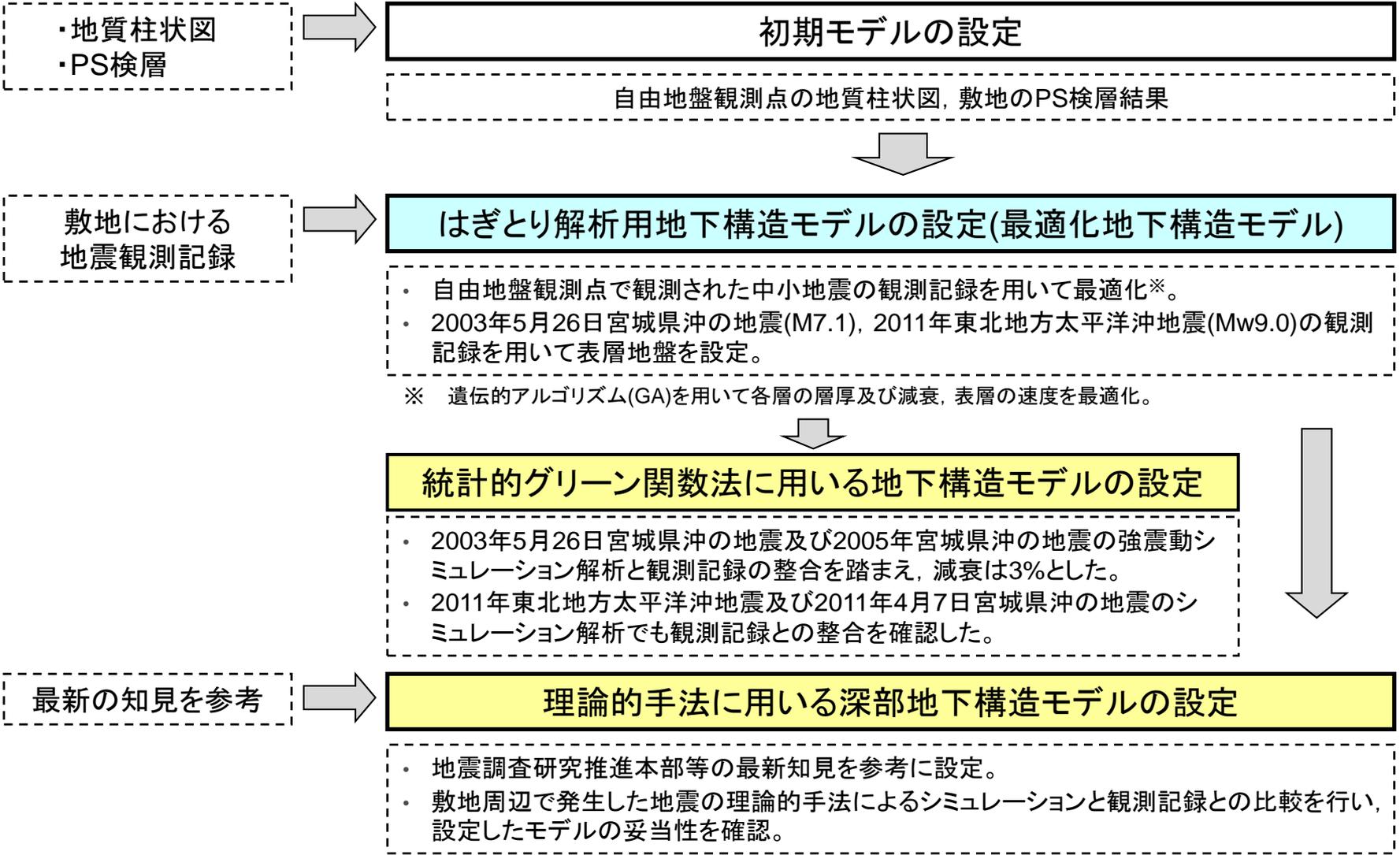
単位 km/sec



速度層区分図(Y-Y')と2号炉原子炉建屋の設置レベル

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 設定のフロー



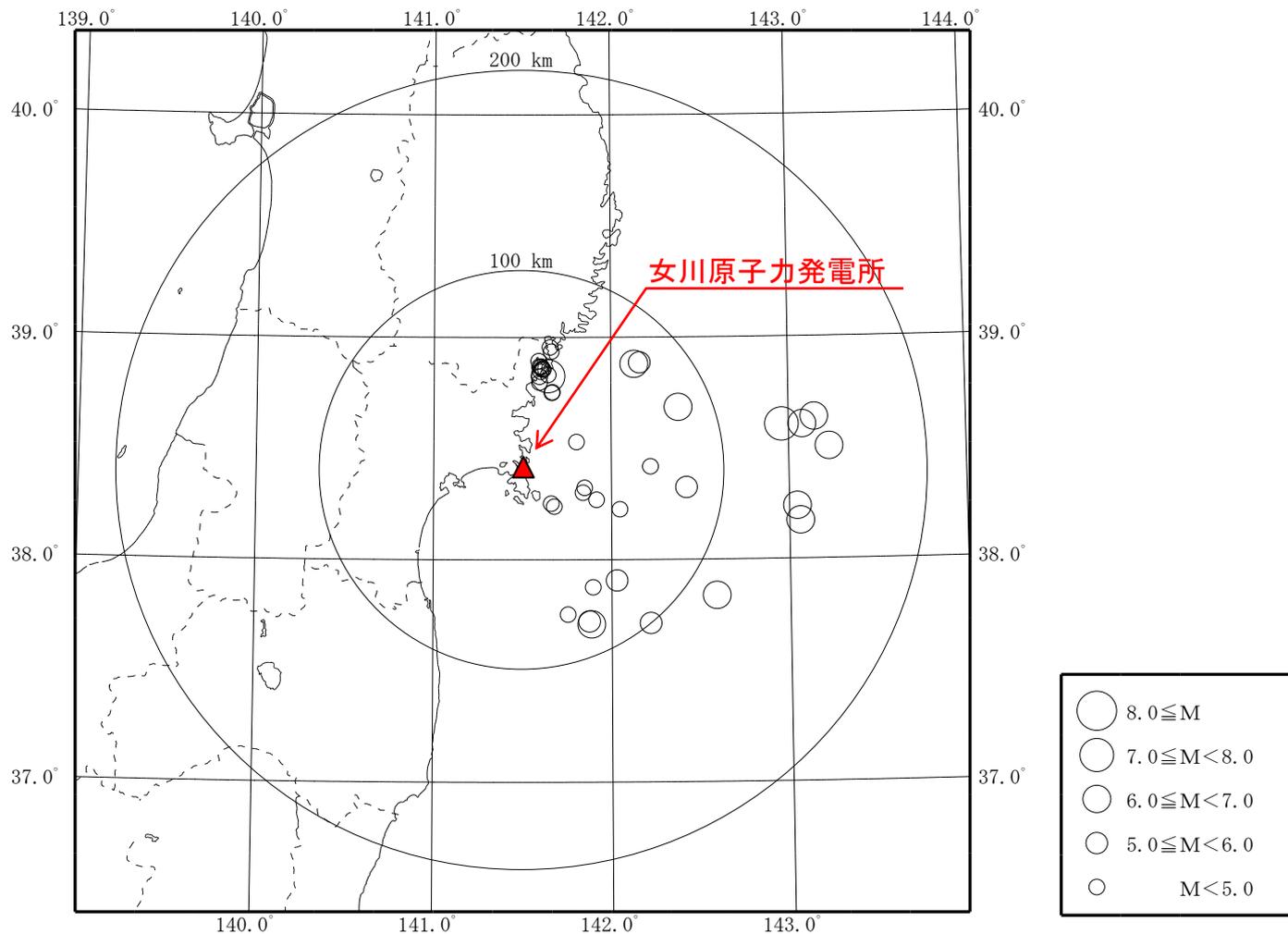
3. 2 水平動のはぎとり解析用地下構造モデル(最適化地盤モデル) (2)

自由地盤観測点の地下構造の同定(Vs)に用いた観測地震

	年月日	時間	規模 M	深さ km	震央地名	震央距離 km	入射角 deg.	方位角 deg.
1	1981/1/18	18:43	6.1	0	宮城県東方はるか沖	152	90	85
2	1981/1/19	3:11	6.1	0	宮城県東方はるか沖	146	90	79
3	1981/1/19	3:17	7.0	0	宮城県東方はるか沖	130	90	80
4	1981/1/19	10:14	6.0	0	宮城県東方はるか沖	140	90	80
5	1981/1/23	4:34	6.6	0	宮城県東方はるか沖	137	90	97
6	1981/1/23	19:22	6.2	0	宮城県東方はるか沖	140	90	100
7	1983/5/24	2:55	5.8	42	宮城県南東沖	73	60	140
8	1984/10/27	20:11	5.4	47	福島県東方沖	83	60	156
9	1985/8/12	12:49	6.4	52	福島県東方沖	85	58	156
10	1986/12/1	5:15	6.0	51	金華山付近	77	56	46
11	1994/3/22	16:23	4.7	48	宮城県東方沖	52	48	112
12	1994/8/14	18:06	6.0	42	宮城県東方沖	83	63	68
13	1994/8/16	19:09	6.0	22	宮城県南東沖	115	79	123
14	1995/7/27	6:29	4.3	58	金華山付近	22	21	139
15	1995/11/6	12:12	4.9	47	宮城県東方沖	63	53	88
16	1997/10/11	18:45	5.2	50	宮城県東方沖	79	58	47
17	1998/3/8	9:02	4.3	52	金華山付近	30	30	63
18	1998/3/12	4:27	5.1	35	宮城県南東沖	100	70	140
19	1998/8/24	23:19	4.4	61	福島県東方沖	76	51	162
20	1998/11/30	22:52	3.7	48	宮城県東方沖	32	34	111
21	1999/6/18	16:08	3.9	51	金華山付近	24	25	139

	年月日	時間	規模 M	深さ km	震央地名	震央距離 km	入射角 deg.	方位角 deg.
22	1999/8/22	12:50	4.3	45	宮城県南東沖	68	57	149
23	1999/9/6	22:16	4.0	48	宮城県東方沖	32	34	106
24	1999/11/15	10:34	5.7	46	宮城県東方沖	82	61	96
25	2001/5/21	6:34	4.0	47	宮城県東方沖	40	40	112
26	2003/5/26	18:24	7.1	72	宮城県北部	49	34	16
27	2003/5/26	18:29	4.1	63	宮城県北部	49	38	16
28	2003/5/26	18:40	4.7	73	宮城県北部	47	33	11
29	2003/5/26	18:49	4.5	74	宮城県北部	52	35	10
30	2003/5/26	19:09	4.7	70	宮城県北部	45	32	12
31	2003/5/26	20:47	3.8	74	宮城県北部	51	35	12
32	2003/5/26	22:34	4.6	76	宮城県北部	55	36	9
33	2003/5/26	23:48	4.0	74	宮城県北部	52	35	11
34	2003/5/27	0:44	4.9	69	宮城県北部	63	43	13
35	2003/5/27	10:47	4.1	66	金華山付近	42	32	21
36	2003/5/27	13:11	4.1	66	金華山付近	41	32	21
37	2003/5/28	6:24	4.5	74	宮城県北部	51	35	12
38	2003/5/31	18:41	4.6	74	宮城県北部	52	35	11
39	2003/6/1	5:38	4.3	74	宮城県北部	52	35	11
40	2003/6/9	11:55	3.8	74	宮城県北部	50	34	11
41	2003/6/10	16:24	4.9	67	宮城県北部	61	42	14

3. 2 水平動のはぎとり解析用地下構造モデル(最適化地盤モデル) (3)



自由地盤観測点の地下構造の同定(Vs)に用いた観測地震の震央分布

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 はぎとり解析用地下構造モデルの設定

同定したはぎとり解析用地下構造モデル

境界の深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _S (m/s)	減衰定数h(f)=h ₀ f ^α	
G.L. (m)	O.P. (m)				水平	
					h ₀	α
0	18.7					
-1.7	17.0	1.7	2.10	204 (112)	0.10 (0.44)	0.00 (0.38)
-5.0	13.7	3.3				
-21.6	-2.9	16.6				
-27.3	-8.6	5.7	2.55	1500	0.20	1.00
-34.5	-15.8	7.2				
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	1.00	0.87
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	0.77	1.00
-147.1	-128.4	65.3		2600		
—	—	∞				

【GAの計算条件】

- 個体数 20
- 遺伝子長 174
- 世代数 100
- 交差率 0.7500
- 突然変異率 0.0100

【計算結果】

Misfit値 0.0196483

▽岩盤上部

(解放基盤表面の地震
観測点)

▽地震基盤※

※ 統計的グリーン関数法の地震
基盤波を入力する位置

※ ()は、3.11地震に用いる値を示す。41地震による同定結果を踏まえ、表層部を2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて同定。

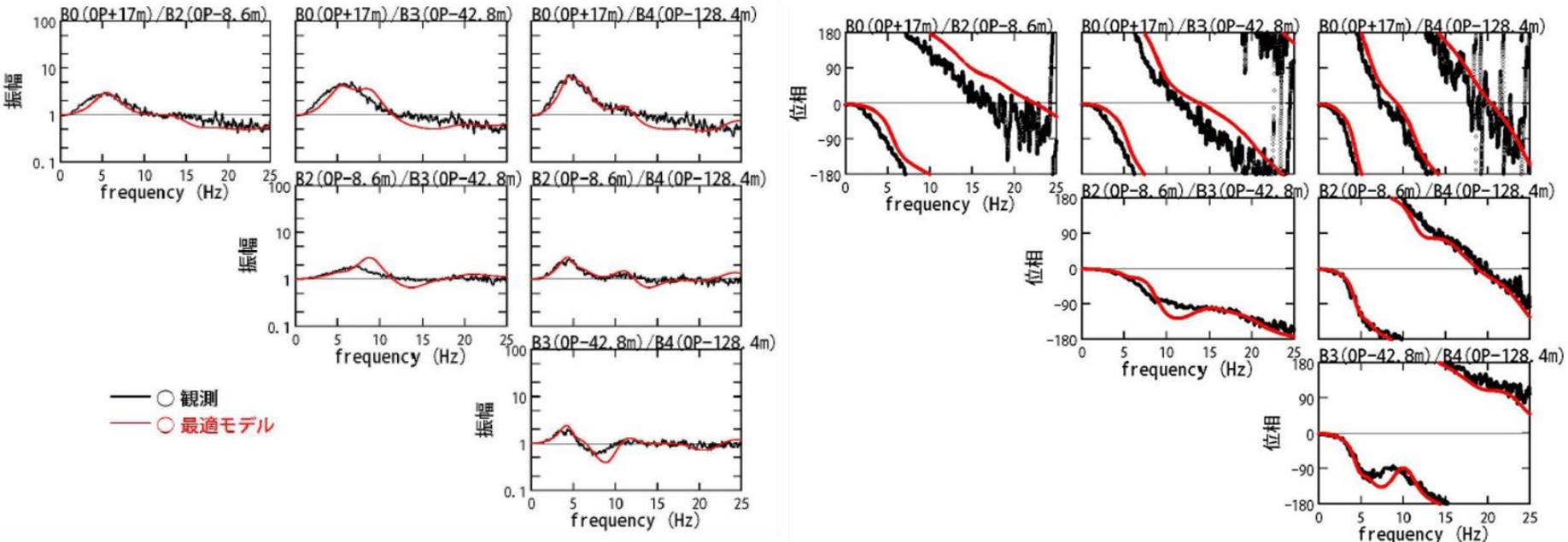
2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 はぎとり解析用地下構造モデルの整合性の確認(1)

➤ 最適化地盤モデルの理論伝達関数と3.11地震の観測記録の伝達関数

地盤モデルの最適化の検討

最適化地盤モデルの地盤伝達関数と3.11地震の伝達関数との比較



水平方向

最適化地盤モデルの地盤伝達関数と3.11地震の地盤伝達関数との比較

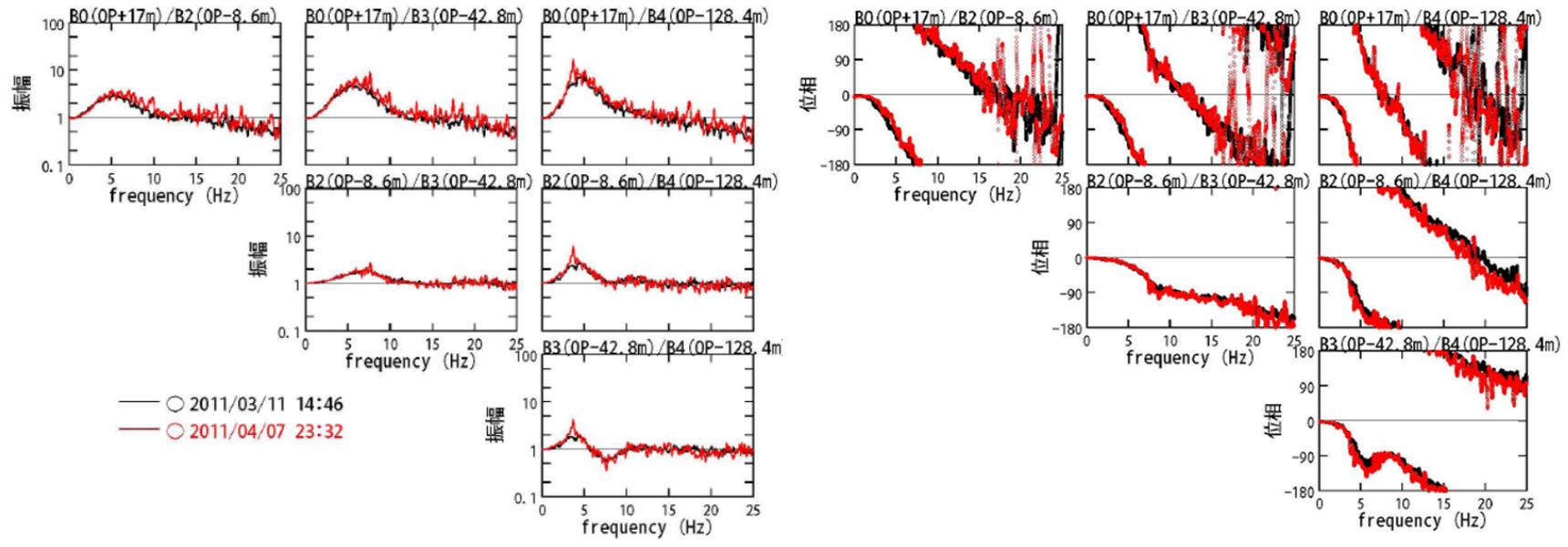
2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 はざと解析用地下構造モデルの整合性の確認(2)

➤ 3.11地震の観測記録の伝達関数と4.7地震の観測記録の伝達関数

4.7地震の地盤伝達特性

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(M9.0)の観測記録の伝達関数との比較(水平)



2011年4月7日宮城県沖の地震と2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録の伝達関数との比較

3.11地震と4.7地震の観測記録の伝達関数は振幅スペクトル, 位相スペクトルのいずれについてもほぼ一致



3.11地震と同様に今回の最適化地盤モデルを用いる

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

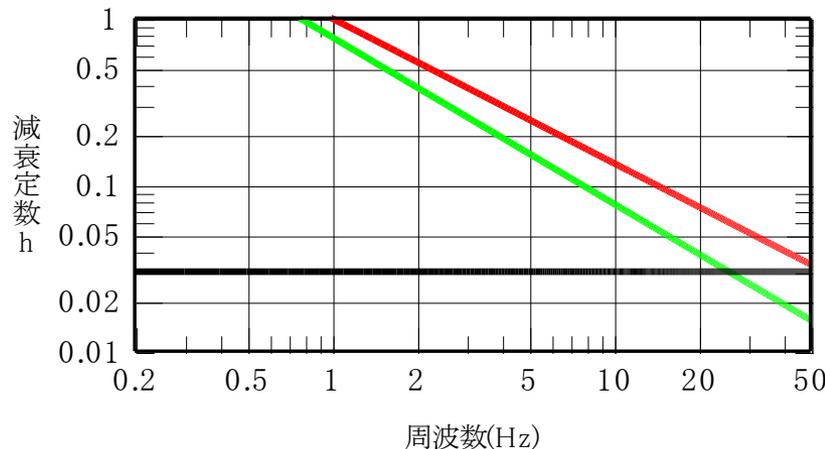
2.4 地下構造モデルの設定 はぎとり解析用地下構造モデルのまとめ

- ボーリング柱状図及び敷地のPS検層結果から自由地盤地震観測点の地下構造の初期モデルを設定。
- 初期モデルを基に、自由地盤地震観測点の地震観測記録に遺伝的アルゴリズムを適用し、自由地盤地震観測点のはぎとり解析用地下構造モデルの同定(層厚, 速度, 減衰)を実施。
- また、2003年5月26日宮城県沖の地震, 2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、表層地盤の速度と減衰を設定。
- 2011年東北地方太平洋沖地震及び2011年4月7日宮城県沖の地震の観測記録と、設定した地下構造モデルの伝達関数が整合していることを確認。

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定

- 女川原子力発電所では、敷地に影響の大きいプレート間地震、海洋プレート内地震の強震記録が得られている。
 - ①2003年5月26日宮城県沖の地震(海洋プレート内地震, M7.1)
 - ②2005年8月16日宮城県沖の地震(プレート間地震, M7.2)
 - ③2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(3.11地震)(プレート間地震, M9.0)
 - ④2011年4月7日宮城県沖の地震(4.7地震)(海洋プレート内地震, M7.2)
- これらの地震について、共通の自由地盤地下構造モデルを用いた統計的グリーン関数法による強震動シミュレーション解析を実施し、観測記録との整合を確認する。
- 統計的グリーン関数法に用いる自由地盤地下構造モデルは、はざとり解析に用いる地下構造モデルと同じ速度構造を用い、減衰は強震動シミュレーション解析結果を踏まえ3%に設定した(全ての強震動シミュレーションに共通)。以下、各地震の強震動シミュレーション解析の概要を示す。



【凡例】

自由地盤のはざとり解析用地下構造モデルの減衰

—: $h(f)=1.00 \times f^{-0.87}$ (O.P.-15.8m~-42.8m)

—: $h(f)=0.77 \times f^{-1.00}$ (O.P.-42.8m~-128.4m)

統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの減衰

—: $h(f)=0.03$

地下構造モデルの減衰定数

(はざとり解析用地下構造モデルと統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの比較)

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定

統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデル

上端深さ		層厚 (m)	密度 (t/m ³)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	減衰 (%)
G.L.(m)	O.P.(m)					
-27.3	-8.6					
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882	3.00
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101	
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503	
-147.1	-128.4	65.3		2600	5300	
—	—	∞	2.68	3000	—	※1

▽岩盤上部

(解放基盤表面の
地震観測点)

▽地震基盤※2

※2 統計的グリーン関数法の地震
基盤盤を入力する位置

※1 プレート間地震, 内陸地殻内地震

$$Q(f) = 110 \cdot f^{0.69} \quad (f \geq 1\text{Hz}), 110 (f < 1\text{Hz}) \quad (\text{地震調査研究推進本部(2005)})$$

海洋プレート内地震

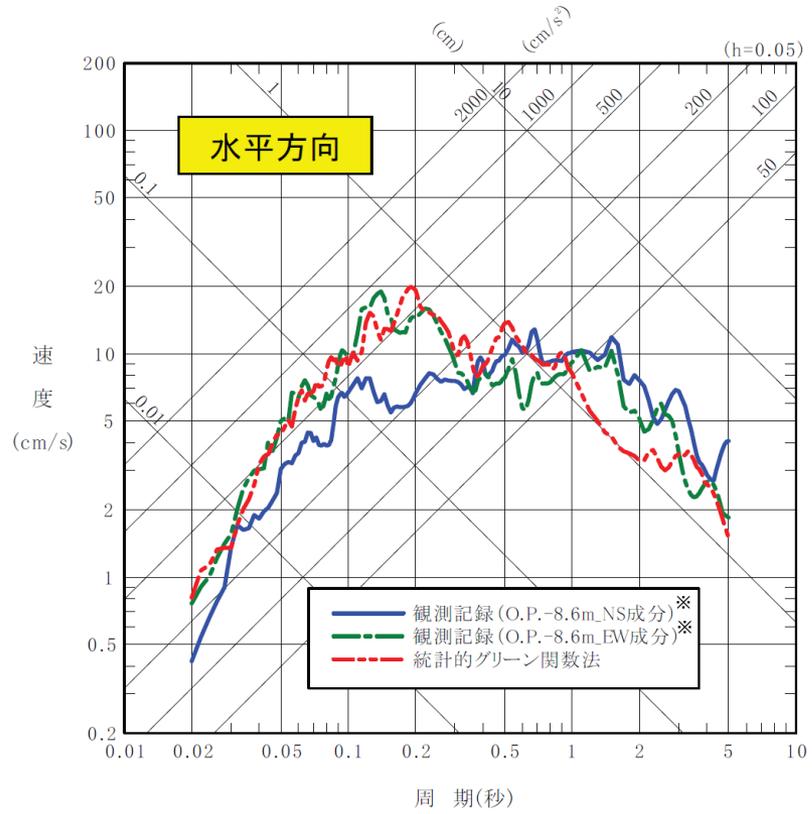
$$Q(f) = 114 \cdot f^{0.92} \quad (\text{佐藤(2004)})$$

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定

➤ 2003年5月26日宮城県沖の地震の強震動シミュレーション

2003年宮城県沖の地震に関する統計的グリーン関数法を用いたシミュレーション解析(女川)



岩盤上部(O.P.-8.6m)における地震観測記録(はざとり波)

統計的グリーン関数法は、2003年宮城県沖の地震の強震記録と整合

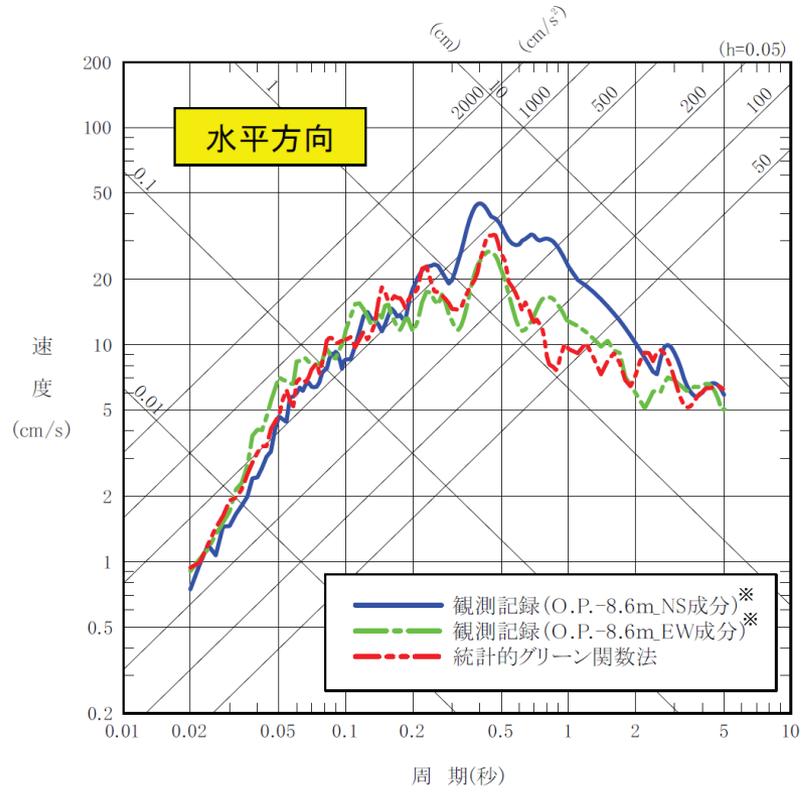
※:敷地岩盤上部(O.P.-8.6m)の観測記録について、表層の地盤の影響を除去したはざとり波。

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定

➤ 2005年8月16日宮城県沖の地震の強震動シミュレーション

2005年宮城県沖の地震に関する統計的グリーン関数法を用いたシミュレーション解析(女川)



岩盤上部(O.P.-8.6m)における地震観測記録(はぎとり波)

統計的グリーン関数法は、2005年宮城県沖の地震の強震記録と整合

※:敷地岩盤上部(O.P.-8.6m)の観測記録について、表層の地盤の影響を除去したはぎとり波。

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定

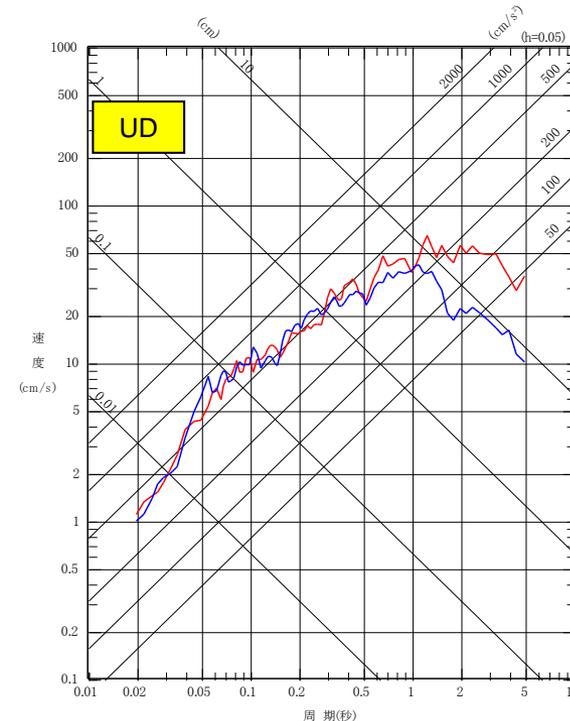
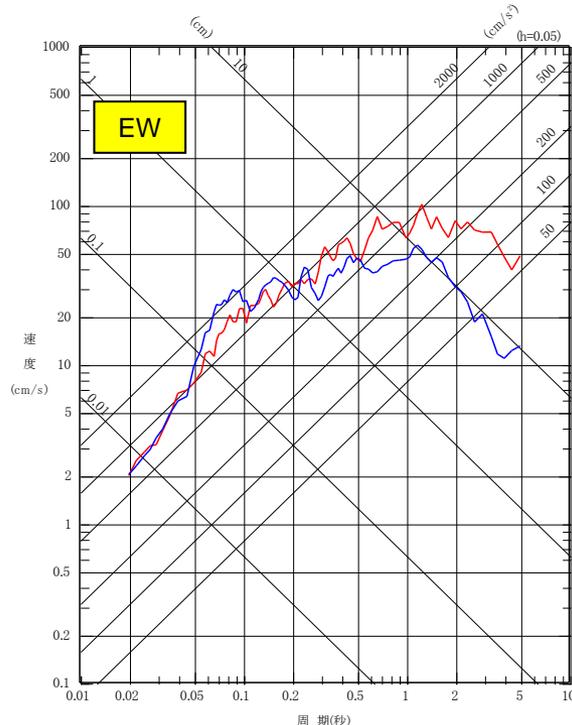
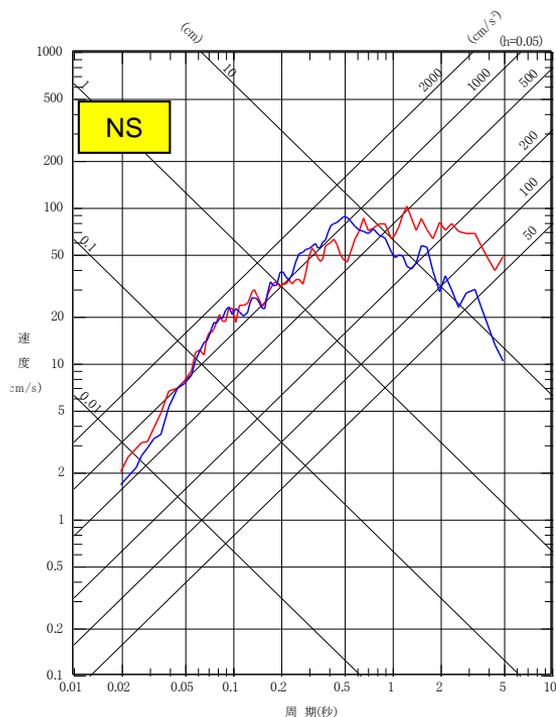
➤ 3.11地震の強震動シミュレーション

・地域特性として諸井ほか(2013)の短周期レベル(応力降下量)×1.4を考慮。

— 評価結果(短周期レベルの地域性考慮)
— 3.11地震観測記録※

— 評価結果(短周期レベルの地域性考慮)
— 3.11地震観測記録※

— 評価結果(短周期レベルの地域性考慮)
— 3.11地震観測記録※



3.11地震の観測記録(岩盤上部のはぎとり波)との比較

3.11地震の観測記録と評価結果は整合。

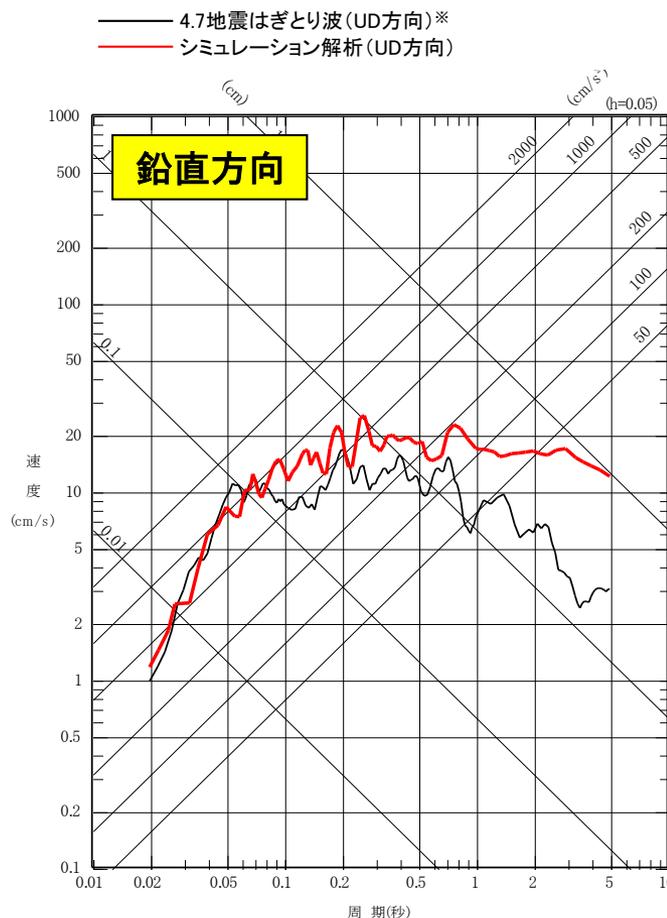
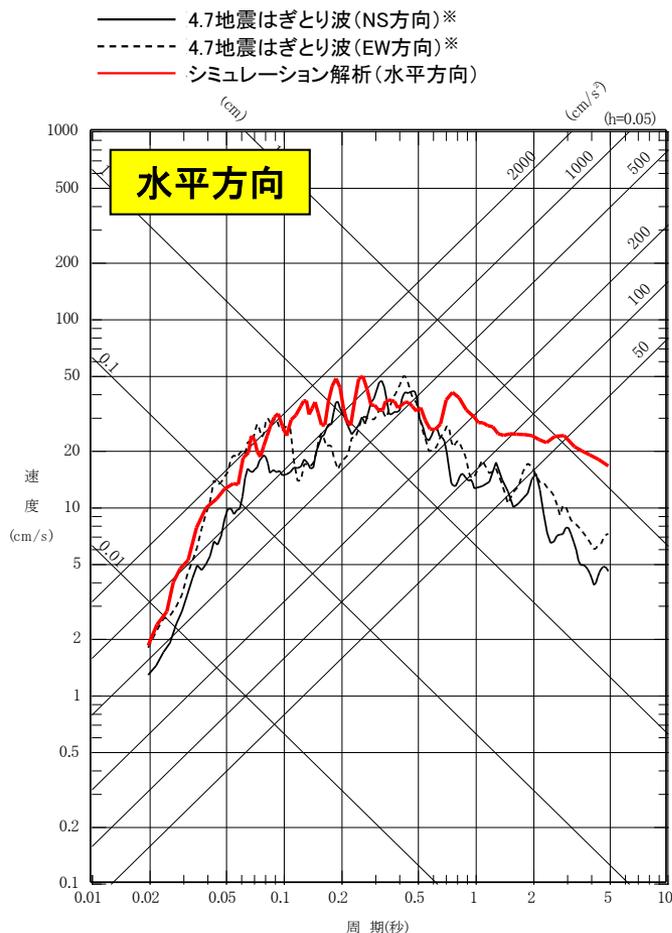
※:敷地岩盤上部(O.P.-8.6m)の観測記録について、表層の地盤の影響を除去したはぎとり波。

2. 敷地地盤の振動特性及び地下構造モデルの策定

2.4 地下構造モデルの設定 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデルの設定

➤ 4.7地震の強震動シミュレーション

- ・応答スペクトルの比較では、周期0.1秒より短周期側では解析結果と観測記録(はぎとり波)は、良く整合している。長周期側では解析結果が大きめの結果となった。
- ・地震動シミュレーション結果は長周期が大きい等の課題は残るものの、原子力発電所において特に問題となる短周期における適合性が良いことから、施設に与える影響検討という観点からは、良好な評価と考えられる。



放射特性係数は0.62

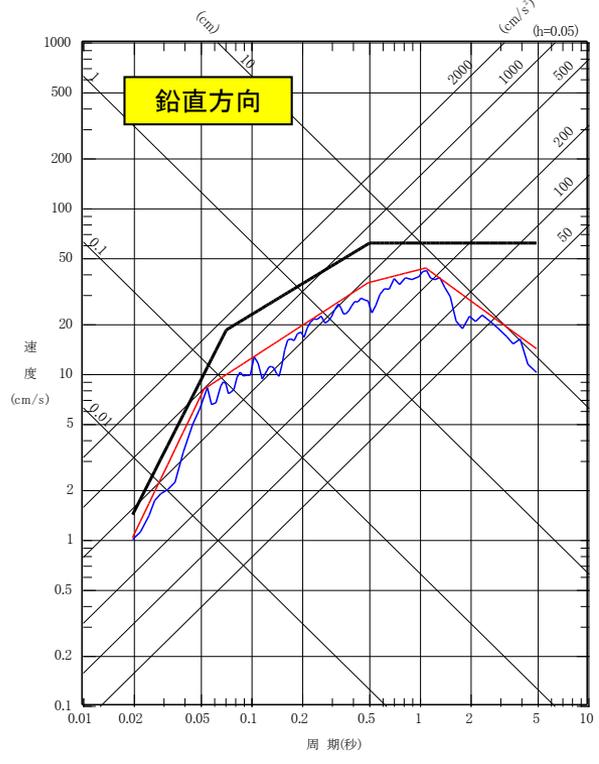
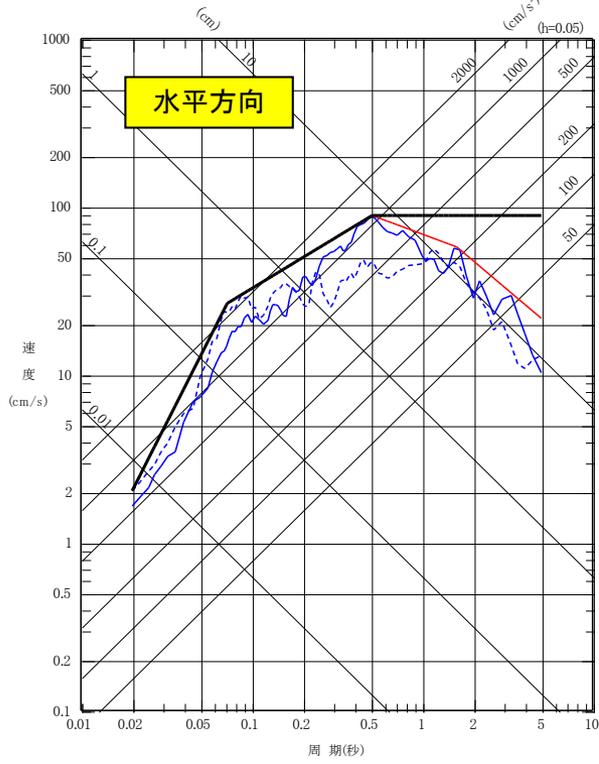
※:敷地岩盤上部(O.P.-8.6m)の観測記録について、表層の地盤の影響を除去したはぎとり波。

5. 基準地震動の策定 / 5.1 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動

5.1.1 応答スペクトル手法による基準地震動 プレート間地震

・プレート間地震の応答スペクトル手法による地震動評価結果を包絡する設計用応答スペクトルを基準地震動Ss-D1として設定、特に、長周期側の裕度を考慮した形状としている。なお、鉛直方向の設計用応答スペクトルは、水平方向の2/3倍としている。

- 基準地震動Ss-D1 [プレート間地震の応答スペクトル手法による基準地震動]
- プレート間地震の応答スペクトル手法による地震動評価
- 【参考】3.11地震の観測記録※1(水平方向は実線: NS方向, 点線: EW方向, 鉛直方向は実線: UD方向)



※1: 敷地岩盤上部(O.P.※2 - 8.6m)の観測記録について、表層の影響を除去したはざとり波。
 ※2: O.P.は女川原子力発電所工事用基準面(Onagawa Peil)であり、O.P.±0m = T.P.(東京湾平均海面) - 0.74m。

応答スペクトル		コントロールポイント			
		A	B	C	D
Ss-D1H	周期(s)	0.02	0.072	0.51	5
	速度(cm/s)	2.0372	26.5	88.4	88.4

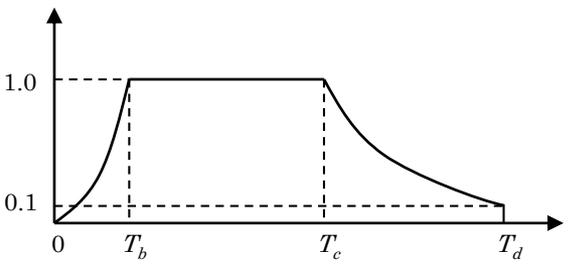
応答スペクトル		コントロールポイント			
		A	B	C	D
Ss-D1V	周期(s)	0.02	0.072	0.51	5
	速度(cm/s)	1.3687	17.7	59.0	59.0

5. 基準地震動の策定 / 5.1 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動
5.1.1 応答スペクトル手法による基準地震動 模擬地震波

➤ 模擬地震波の作成: 包絡線の経時的变化

・基準地震動S_s-D1, S_s-D2及びS_s-D3の設計用応答スペクトルに適合する模擬地震波は, 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变化については, Noda et al.(2002)の方法に基づき, それぞれ下記に示す形状とする。

模擬地震波	最大加速度 (cm/s ²)	マグニチュード M	等価震源距離 X _{eq} (km)	振幅包絡線の経時的变化(s)			備考
				T _b	T _c	T _d (継続時間)	
S _s -D1H	640	8.3	132	16.6	47.5	137.9	Mは次頁を参照し, X _{eq} はプレート間地震(基本ケース)の断層モデルに基づき設定。
S _s -D1V	430						
S _s -D2H	1000	7.5	72	6.6	24.3	72.0	M, X _{eq} は海洋プレート内地震(基本ケース)の断層モデルに基づき設定。
S _s -D2V	600						
S _s -D3H	800	7.5	65	6.6	24.3	69.4	M, X _{eq} は海洋プレート内地震(不確かさケース2)の断層モデルに基づき設定。
S _s -D3V	500						



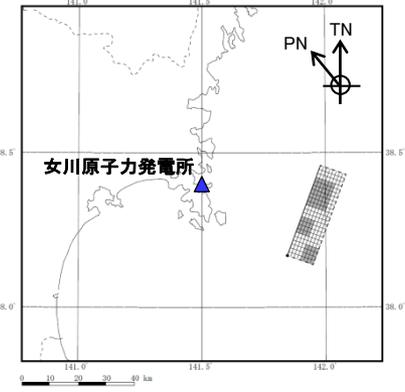
$$T_b = 10^{0.5M - 2.93}$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M - 1.0}$$

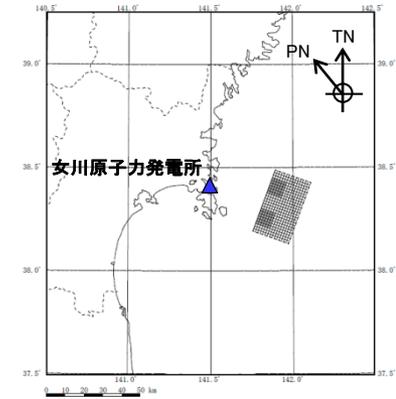
$$T_d - T_c = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6}$$



プレート間地震(基本ケース)
の断層モデル(巨視的面)



海洋プレート内地震(基本ケース)
の断層モデル



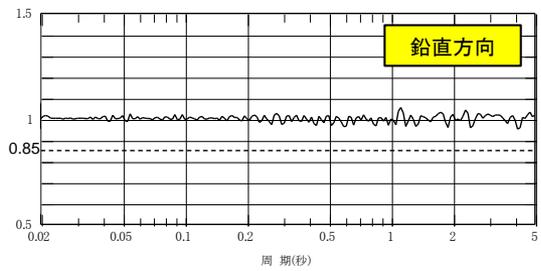
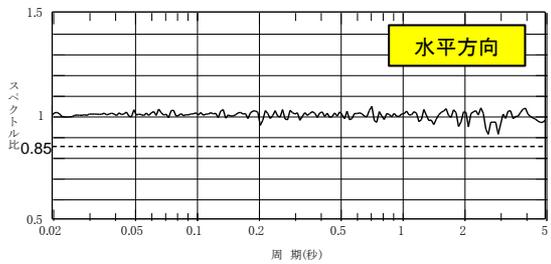
海洋プレート内地震(不確かさケース2)
の断層モデル

5. 基準地震動の策定 / 5.1 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動
5.1.1 応答スペクトル手法による基準地震動 模擬地震波

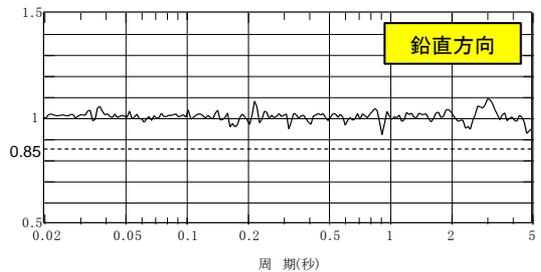
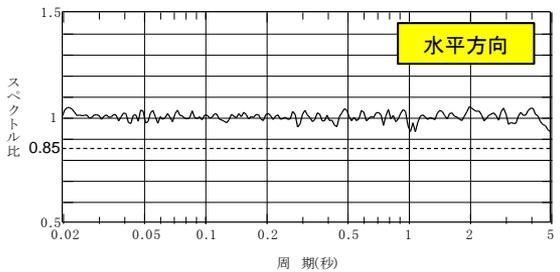
▶ 模擬地震波の作成結果: 適合度の確認

・作成した模擬地震波が、日本電気協会(2008)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した。
 ① 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の比が全周期帯で0.85以上
 ② 応答スペクトルの強度値の比(SI比)が1.0以上

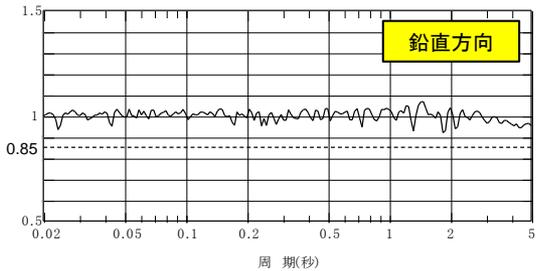
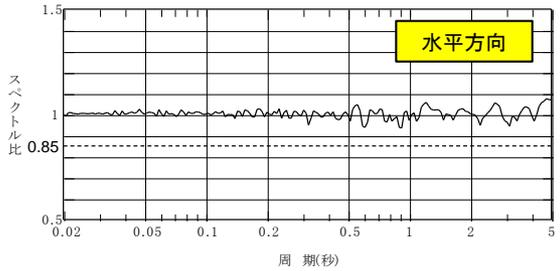
基準地震動S_s-D1の応答スペクトル比



基準地震動S_s-D2の応答スペクトル比



基準地震動S_s-D3の応答スペクトル比



応答スペクトルの強度値の比(SI比)

模擬地震波	SI比 (周期0.1~2.5秒)
S _s -D1H	1.00
S _s -D1V	1.00
S _s -D2H	1.00
S _s -D2V	1.00
S _s -D3H	1.00
S _s -D3V	1.00

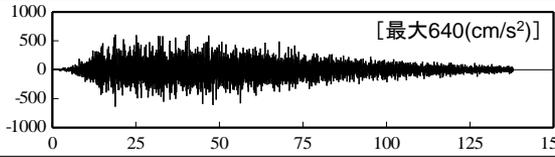
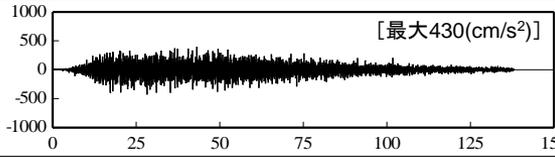
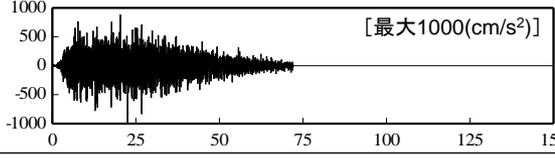
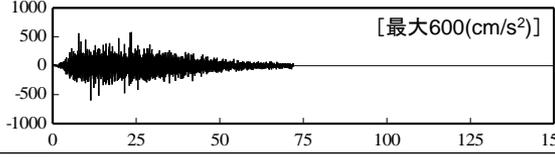
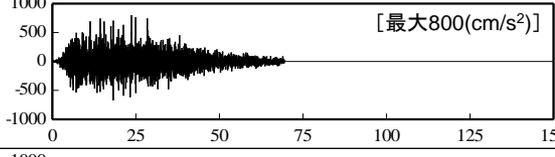
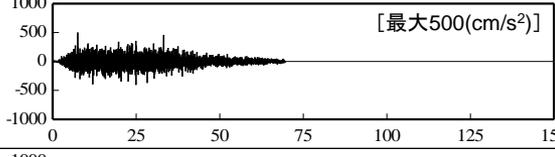
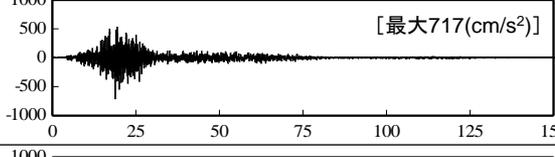
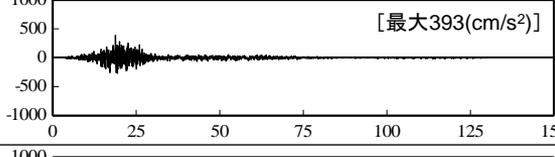
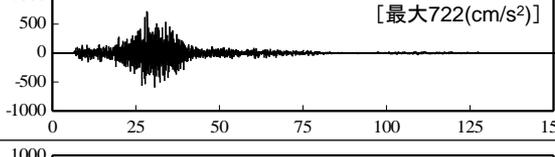
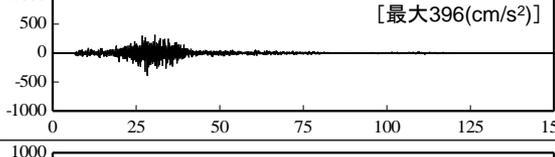
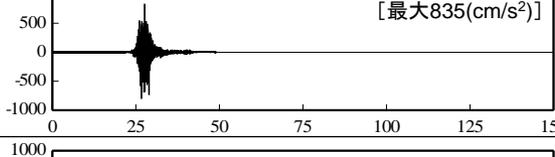
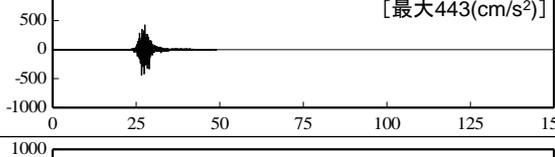
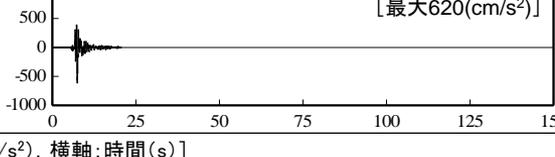
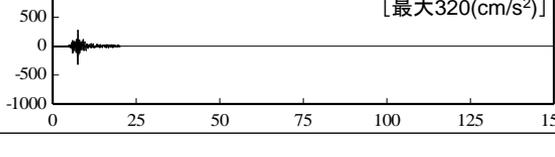
$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} Sv(T)dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}v(T)dt}$$

ここで、

- SI : 応答スペクトル強さ
- $Sv(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)
- $\bar{S}v(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)
- T : 固有周期 (s)

5. 基準地震動の策定

5.3 基準地震動の策定のまとめ 最大加速度値

基準地震動		水平方向	鉛直方向
Ss-D1	プレート間地震の応答スペクトル手法による基準地震動	 [最大640(cm/s ²)]	 [最大430(cm/s ²)]
Ss-D2	海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の応答スペクトル手法による基準地震動	 [最大1000(cm/s ²)]	 [最大600(cm/s ²)]
Ss-D3	海洋プレート内地震(SMGA地殻内)の応答スペクトル手法による基準地震動	 [最大800(cm/s ²)]	 [最大500(cm/s ²)]
Ss-F1	プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動 [応力降下量(短周期レベル)の不確かさ]	 [最大717(cm/s ²)]	 [最大393(cm/s ²)]
Ss-F2	プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動 [SMGA位置と応力降下量(短周期レベル)の不確かさの重畳]	 [最大722(cm/s ²)]	 [最大396(cm/s ²)]
Ss-F3	海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の断層モデル手法による基準地震動(SMGAマントル内集約)	 [最大835(cm/s ²)]	 [最大443(cm/s ²)]
Ss-N1	2004年北海道留萌支庁南部地震(K-NET港町)の検討結果に保守性を考慮した地震動	 [最大620(cm/s ²)]	 [最大320(cm/s ²)]

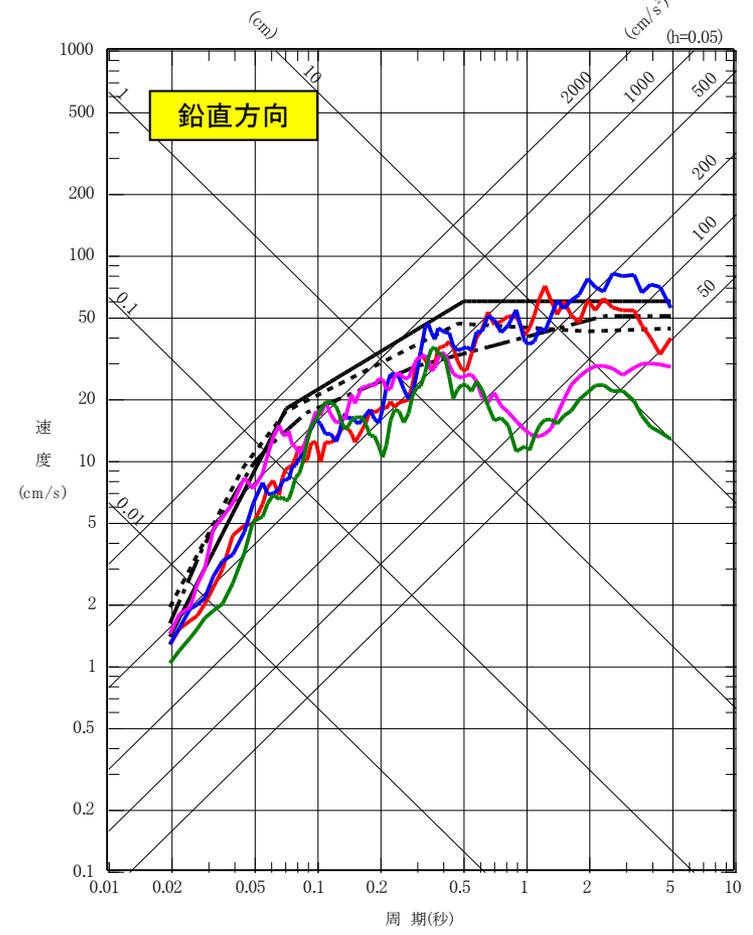
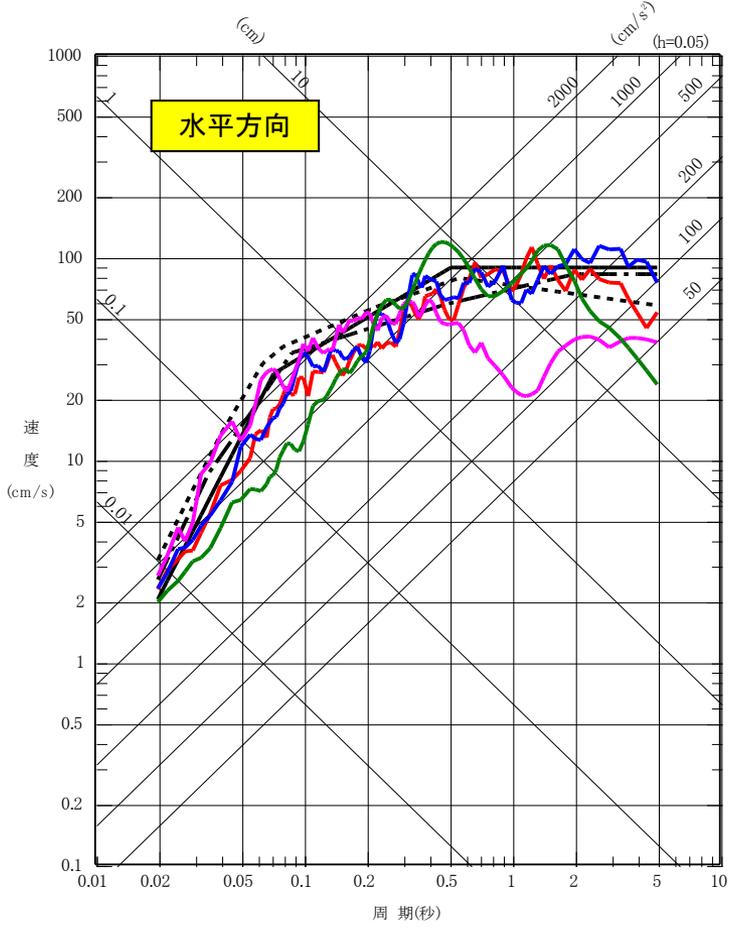
注1: 表中のグラフは各基準地震動の加速度時刻歴波形[縦軸: 加速度(cm/s²), 横軸: 時間(s)]

注2: 断層モデルによる基準地震動のSs-F1, Ss-F2, Ss-F3については, 3.11地震, 4.7地震の観測記録との整合性を確認したシミュレーションでの手法(統計的グリーン関数法, 放射特性一定)を用いていることから水平一方向としている。

5. 基準地震動の策定

5.3 基準地震動の策定のまとめ 応答スペクトル

- 基準地震動Ss-D1 [プレート間地震の応答スペクトル手法による基準地震動]
- - - 基準地震動Ss-D2 [海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の応答スペクトル手法による基準地震動]
- · - · 基準地震動Ss-D3 [海洋プレート内地震(SMGA地殻内)の応答スペクトル手法による基準地震動]
- 基準地震動Ss-F1 [プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動(応力降下量(短周期レベル)の不確かさ)]
- 基準地震動Ss-F2 [プレート間地震の断層モデル手法による基準地震動(SMGA位置と応力降下量(短周期レベル)の不確かさの重畳)]
- 基準地震動Ss-F3 [海洋プレート内地震(SMGAマントル内)の断層モデル手法による基準地震動(SMGAマントル内集約)]
- 基準地震動Ss-N1 [2004年北海道留萌支庁南部地震(K-NET港町)の検討結果に保守性を考慮した地震動]



参考資料

3. 女川原子力発電所2号炉

基準地震動の変更が不要であることを説明する文書

東北電原設第1号
2021年5月20日

原子力規制委員会 殿

仙台市青葉区本町一丁目7番1号
東北電力株式会社
取締役社長 社長執行役員
樋口 康二郎

女川原子力発電所2号炉
基準地震動の変更が不要であることを説明する文書

令和3年4月26日付「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正に係る対応について（指示）」（原規規発第2104264号）に基づき、下記のとおり、女川原子力発電所2号炉について、基準地震動の変更が不要であることを説明する文書を提出いたします。

記

標記について「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正について（令和3年4月21日決定）」に基づき、添付資料のとおり、新たに制定された標準応答スペクトルと現行の基準地震動S sとの比較を行ったところ、標準応答スペクトルに基づく地震動は基準地震動S sに包絡されることを確認した。

このため、女川原子力発電所2号炉は、改正後の解釈を適用しても基準地震動を変更する必要はないと考える。

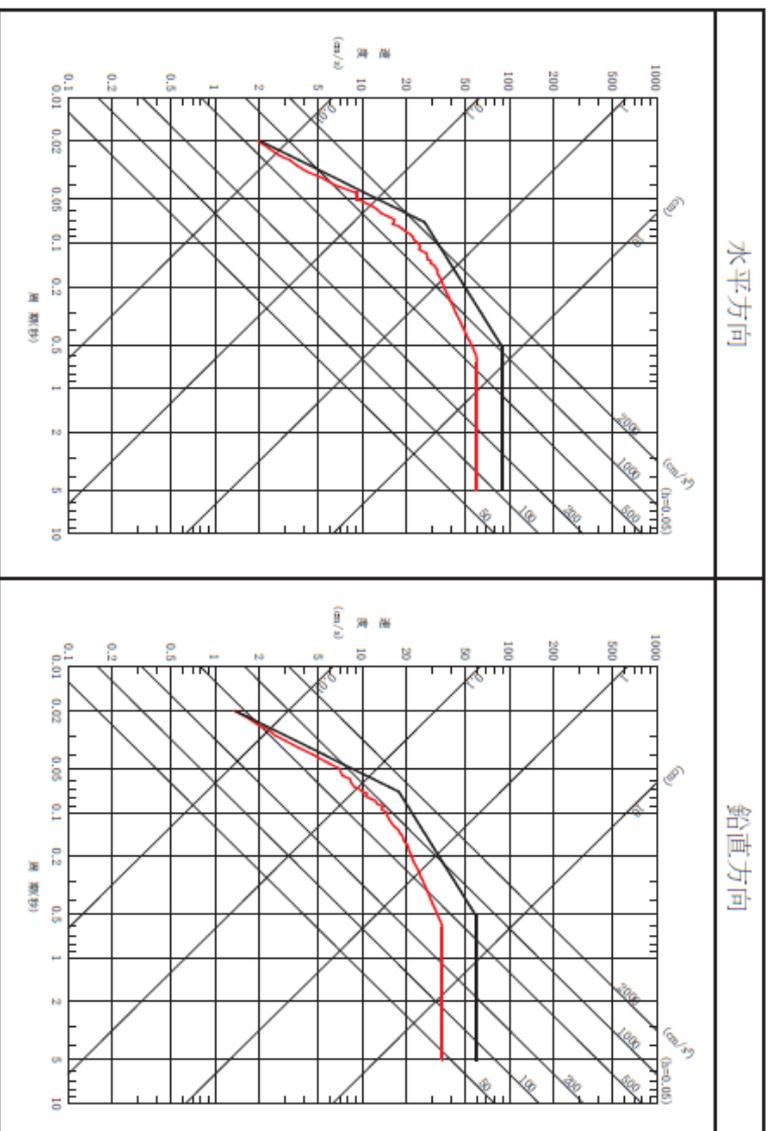
以上

（添付資料）女川原子力発電所2号炉 標準応答スペクトルに基づく地震動と基準地震動S sの比較結果

女川原子力発電所 2号炉
標準応答スペクトルに基づく地震動と基準地震動 S s の比較結果

標準応答スペクトルに基づく地震動が、女川原子力発電所 2号炉の基準地震動 S s に包絡されることを確認した。

【凡例】 —：標準応答スペクトルに基づく地震動 —：基準地震動 S s - D 1



※ 標準応答スペクトルはせん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地震基底相当面にて定義されている。女川原子力発電所の解放基底表面の振動特性は、自由地盤の地震観測点 O.P.-8.6m (岩盤上部: $V_s=1500\text{m/s}$) で代表させていることから、標準応答スペクトルに対し地震基底相当面から解放基底表面までの地盤補正を行った (別紙)。

標準応答スペクトルに基づく地震動の地盤補正方法

解放基盤表面の振動特性を代表する位置 ($V_s=1500\text{m/s}$ 層上面) で策定された基準地震動 S-D1 について、女川原子力発電所の地下構造モデル^{※1}のうち標準応答スペクトルが定義される地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 層上面) での引戻し波との応答スペクトル比を求め、これを標準応答スペクトルに乗ずることで地盤補正を考慮する。

女川原子力発電所の地下構造モデル

上端深さ	層厚	密度	V_s	V_p	減衰
(m)	(m)	(t/m^3)	(m/s)	(m/s)	(%)
G.L. (m)	0.P. (m) ^{※2}				
-27.3	-8.6				
-34.5	-15.8	7.2	2.55	1500	2882
-61.5	-42.8	27.0	2.66	2000	4101
-81.8	-63.1	20.3	2.68	2200	4503
-147.1	-128.4	65.3	2600	5300	
-	-	∞	2.68	3000	
					※3

解放基盤表面の振動特性を代表する位置

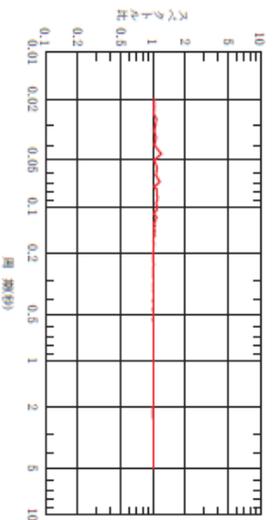
地震基盤相当面

※1 統計的グリーン関数法に用いる地下構造モデル

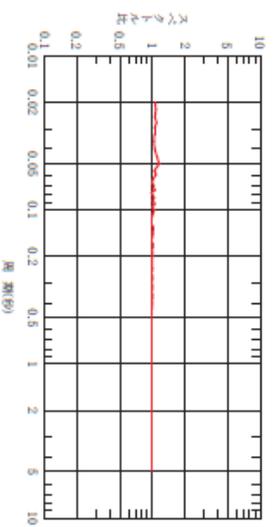
※2 O.P. (女川原子力発電所工事用基準面) $\pm 0\text{m}=\text{T.P.}$ (東京湾平均海面) -0.74m

※3 内陸地殻内地震 [地震調査研究推進本部 (2005) による]

$$Q(f)=110 \cdot f^{0.69} \quad (f \geq 1\text{ Hz}), \quad 110 \quad (f < 1\text{ Hz})$$



水平方向



鉛直方向

標準応答スペクトルに乗じる応答スペクトル比

(解放基盤表面/地震基盤相当面)