

原子力科学研究所(JRR-3)

基準地震動に対する標準応答スペクトルの影響検討 (コメント回答資料)

令和3年12月13日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. 会合におけるコメント	.....	2
2. 検討概要	.....	3
3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価	.....	4
4. 参考文献	.....	21
補足資料		
1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比	.....	23

1. 会合におけるコメント

No.	審査会合	コメント	回答状況	ページ
1	<p>令和3年9月3日 第6回標準応答スペクトルの 規制への取り入れに伴う設 置変更許可申請等の要否に 係る会合</p>	<p>地震基盤相当面を$v_s=2,000\text{m/s}$として実施した地震動評価は、規則の解釈の$v_s=2,200\text{m/s}$以上とは異なっており見直すこと。その際、「参考資料で示した再設定した地盤構造モデル(地震基盤相当面$v_s=2,200\text{m/s}$)による評価」とするのか、「既許可の地盤構造モデル(地震基盤相当面$v_s=2,500\text{m/s}$)による評価」とするのか整理検討が必要。なお、「再設定した地盤構造モデルによる評価」とする場合、その位置付けや理由を明確にし、再設定したモデルの妥当性、根拠や記載の充実化、既許可の基準地震動(統計的グリーン関数法による地震動評価)への影響についても考慮する必要がある。</p>	<p>今回 ご説明</p>	<p>5~12</p>
2	<p>''</p>	<p>模擬地震波の作成や地盤の伝播特性について、ばらつきや差異があることが否定できないため、乱數位相の他に実位相を考慮し、複数の模擬地震波を作成して応答スペクトルへの影響を確認すること。例えば、敷地内の観測記録の活用等考慮の上、検討すること。</p>	<p>''</p>	<p>13~20</p>

2. 検討概要

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

■ 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。

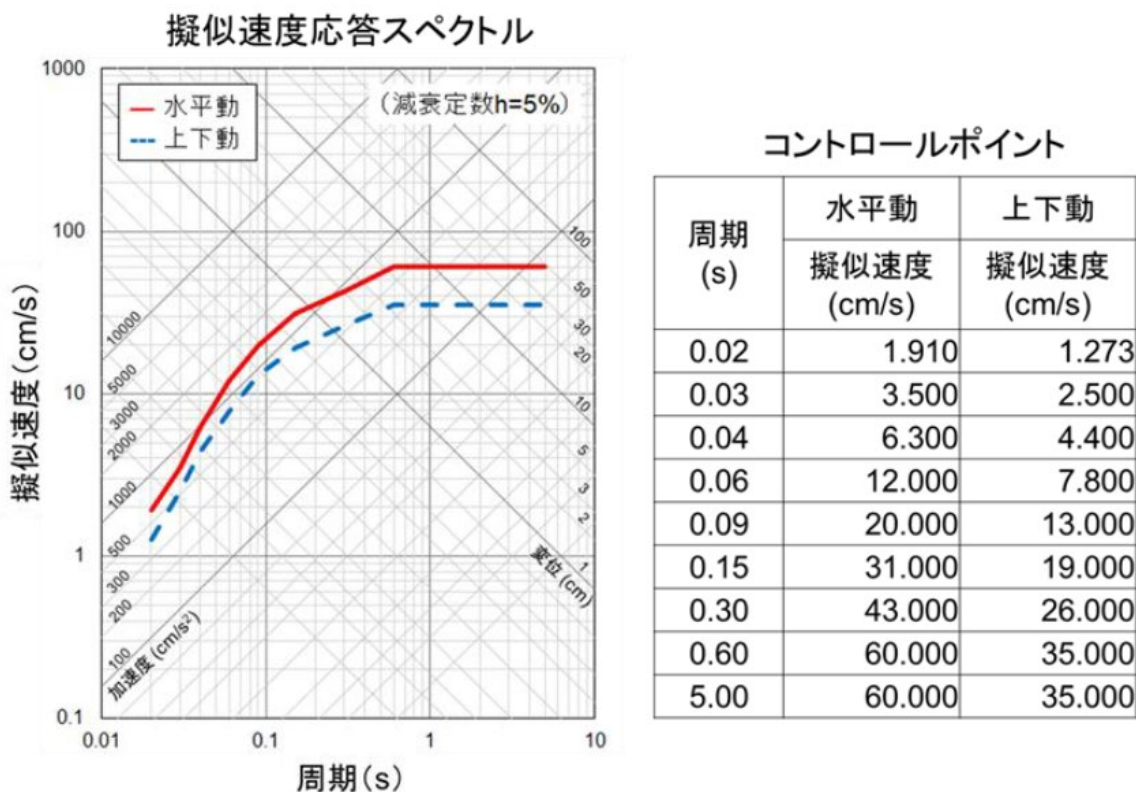
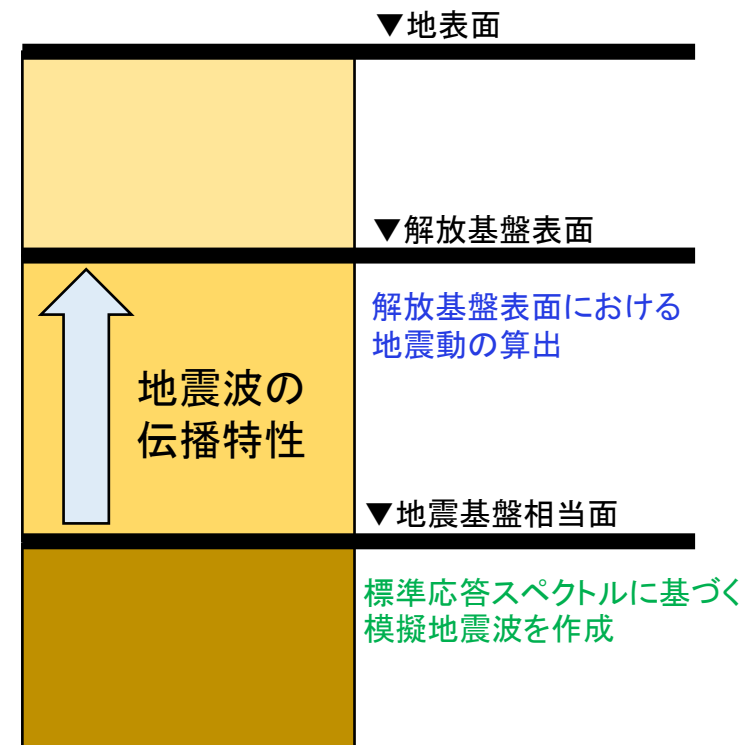
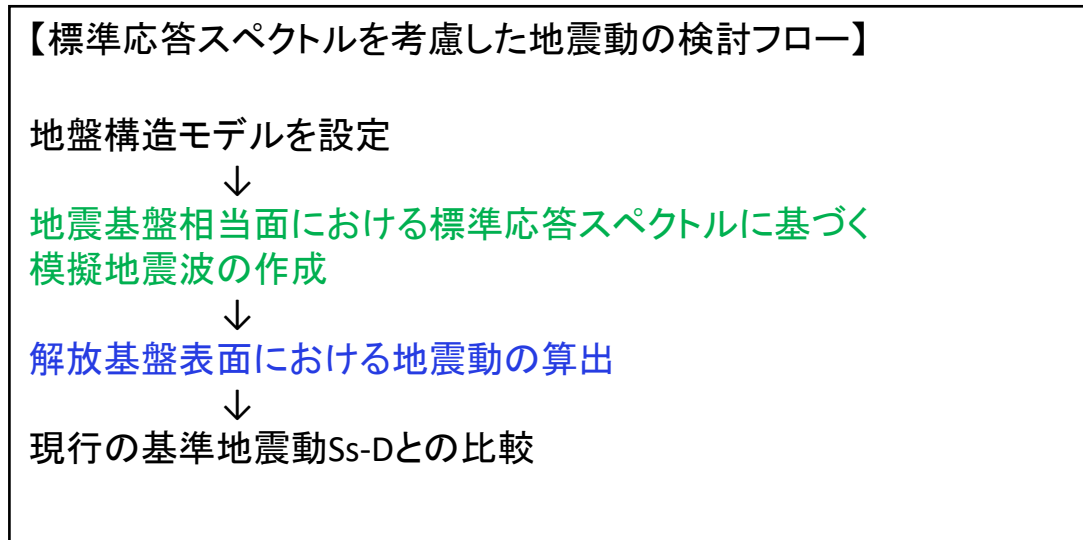


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル
※2021年4月21日原子力規制委員会資料より抜粋

- 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

3. 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

【地盤構造モデルの設定】

- 震源を特定せず策定する地震動として考慮する標準応答スペクトルは、地震基盤相当面 ($V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の地層) において規定されている。
既許可の地盤構造モデルには標準応答スペクトルが規定される $V_s=2,200\text{m/s}$ の地層がないことから、本検討では既許可の地盤構造モデルで $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上となるG.L.-0.997km位置 ($V_s=2,500\text{m/s}$ の地層) を地震基盤相当面に設定する。
- 敷地における解放基盤表面は $V_s=710\text{m/s}$ の地層(G.L.-0.360kmの位置)に設定しており、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際、地震基盤相当面から解放基盤表面までの増幅特性を考慮する。
- 地震動の増幅特性の考慮に際しては、標準応答スペクトルが規定されている $V_s=2,200\text{m/s}$ と敷地の地震基盤相当面とした $V_s=2,500\text{m/s}$ との地盤物性の差異を地震動評価に反映させるため、以下の検討を行い、応答スペクトル強さの比(SI比)の大きい方を選定する。

検討① 透過係数を用いた検討

$V_s=2,500\text{m/s}$ と $V_s=2,200\text{m/s}$ の地盤物性が異なる影響について、透過係数(インピーダンスによる差異)を考慮して地盤応答解析を行い、解放基盤表面の地震動を評価する。

検討② 地震基盤相当面以深を $V_s=2,200\text{m/s}$ とした検討

標準応答スペクトルが、 $V_s=2,200\text{m/s}$ で設定された応答スペクトルであることから、既許可の地盤構造モデルのG.L.-0.997km位置を $V_s=2,200\text{m/s}$ として地盤応答解析を行い、解放基盤表面の地震動を評価する。

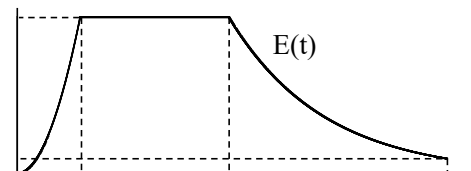
地盤構造モデル

層番号 (No)	上面 G.L.(km)	S波速度 (km/s)	
1	0.000	—	▼解放基盤表面
2	-0.360	0.710	
3	-0.647	1.200	
4	-0.974	1.500	
5	-0.983	2.000	▼地震基盤相当面
6	-0.997	2.500	
7	-1.010	2.900	

- 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
水平方向	600	28.0	3.3	15.0	28.0
鉛直方向	400	28.0	3.3	15.0	28.0

マグニチュード:M=6.9、等価震源距離:Xeq=10km

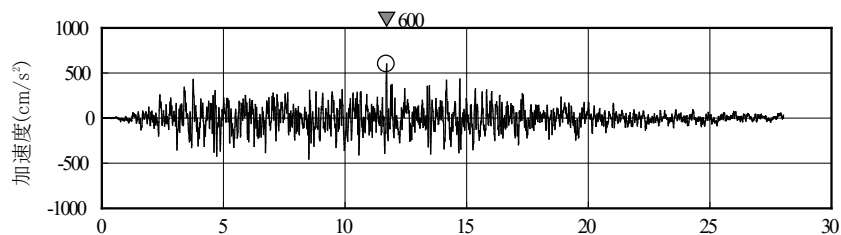


$$t_B = 10^{0.5M - 2.93}$$

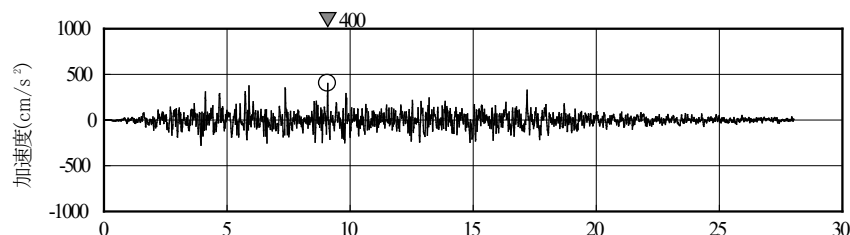
$$t_C - t_B = 10^{0.3M - 1.0}$$

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

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



水平方向

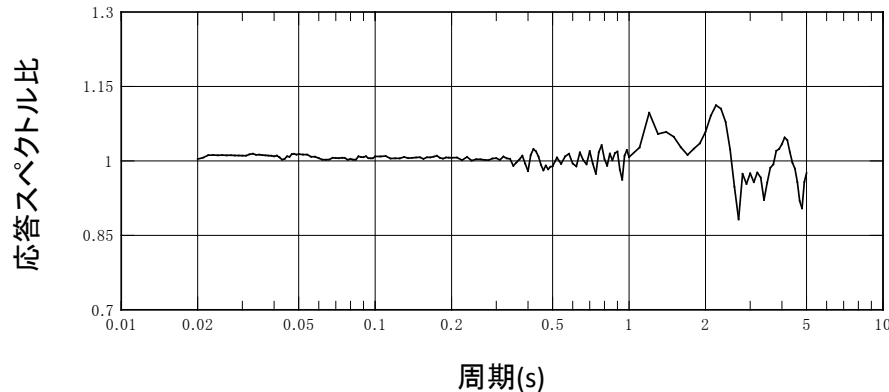


鉛直方向

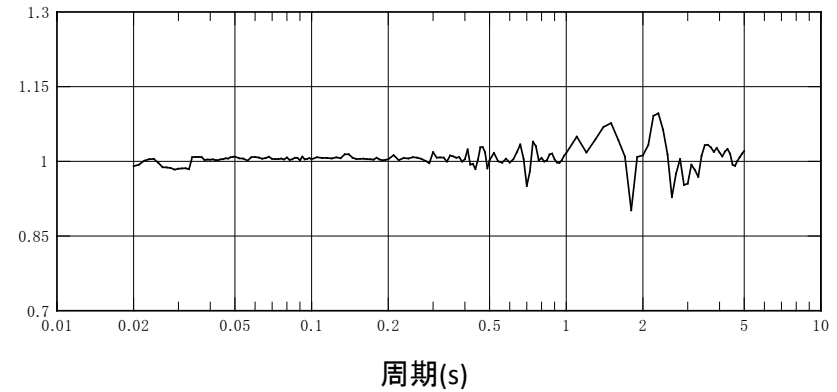
地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波(加速度時刻歴波形)

※標準応答スペクトルに対する適合度の精度向上を目的とし、模擬地震波を見直している。(補足資料1. 参照)。

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



応答スペクトル比(水平方向)



応答スペクトル比(鉛直方向)

応答スペクトル強さの比(SI比)

模擬地震波	SI比
水平方向	1.04
鉛直方向	1.03

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

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

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

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

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

3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 検討① 透過係数を用いた検討

- $V_s=2,500\text{m/s}$ と $V_s=2,200\text{m/s}$ の地盤物性が異なる影響について、透過係数を模擬地震波に乗じて、地震基盤相当面に入力し、解放基盤表面の地震動を評価する。
- 透過係数は弾性体の波動伝播理論に基づき算出する。

地盤構造モデル

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

波動インピーダンス比: $\alpha = (\rho_1 V_1 / \rho_2 V_2)$ 、地震動の透過係数: $\gamma = 2 / (1 + \alpha)$

ここで、 V_1 ρ_1 は原科研のS波速度2,500m/s層の弾性波速度 ($V_s=2,500\text{m/s}$, $V_p=4,800\text{m/s}$)と密度 (2.57g/cm^3)、 V_2 は標準応答スペクトルが規定されている層の弾性波速度 ($V_s=2,200\text{m/s}$, $V_p=4,290\text{m/s}$)、 ρ_2 はLudwig et al(1970)の計算式から算出した密度 (2.48g/cm^3)※2

水平方向のインピーダンス比 $\alpha_s=1.178$ 、透過係数 $\gamma_s=0.918$
鉛直方向のインピーダンス比 $\alpha_p=1.159$ 、透過係数 $\gamma_p=0.926$

したがって、水平方向は $600 \times 0.918 = 551\text{cm/s}^2$ 、鉛直方向は $400 \times 0.926 = 370\text{cm/s}^2$ を地震基盤相当面 (G.L.-0.997km)に入力する。

※1 : P波速度はYoshimura et al(1982)により $V_p=V_s/(0.576-0.139/V_s)$

※2 : $\rho = 1.2475 + 0.3992 \times V_p - 0.026 \times V_p^2$

検討② 地震基盤相当面以深を $V_s=2,200\text{m/s}$ とした検討

- 標準応答スペクトルが、 $V_s=2,200\text{m/s}$ で設定された応答スペクトルであることから、地盤構造モデルのG.L.-0.997km位置を $V_s=2,200\text{m/s}$ として地盤応答解析を行い、解放基盤表面の地震動を評価する。
- P波速度は、Yoshimura et al(1982)により算出した。

地盤構造モデル

層番号	上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm^3)	水平成分		鉛直成分			
				S波速度 (km/s)	減衰定数		P波速度 (km/s)	減衰定数	
					Q_s	h_s		Q_p	h_p
▼解放基盤表面	1	0.000	0.360	—	—	—	—	—	—
	2	-0.360	0.287	1.86	0.710	100	0.005	100	0.005
	3	-0.647	0.327	2.11	1.200				
	4	-0.974	0.009	2.24	1.500				
	5	-0.983	0.014	2.42	2.000				
▼地震基盤相当面	6	-0.997	0.013	2.57	2.500 ⇒ 2.200			4.800 ⇒ 4.290	
	7	-1.010	3.790	2.66	2.900	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$	$110 \times f^{0.69}$	$0.0045 \times f^{-0.69}$
	8	-4.800	12.640	2.70	3.600				
	9	-17.440	14.560	2.80	4.170				
	10	-32.000	∞	3.20	4.320				

P波速度: $V_p = V_s / (0.576 - 0.139 / V_s)$

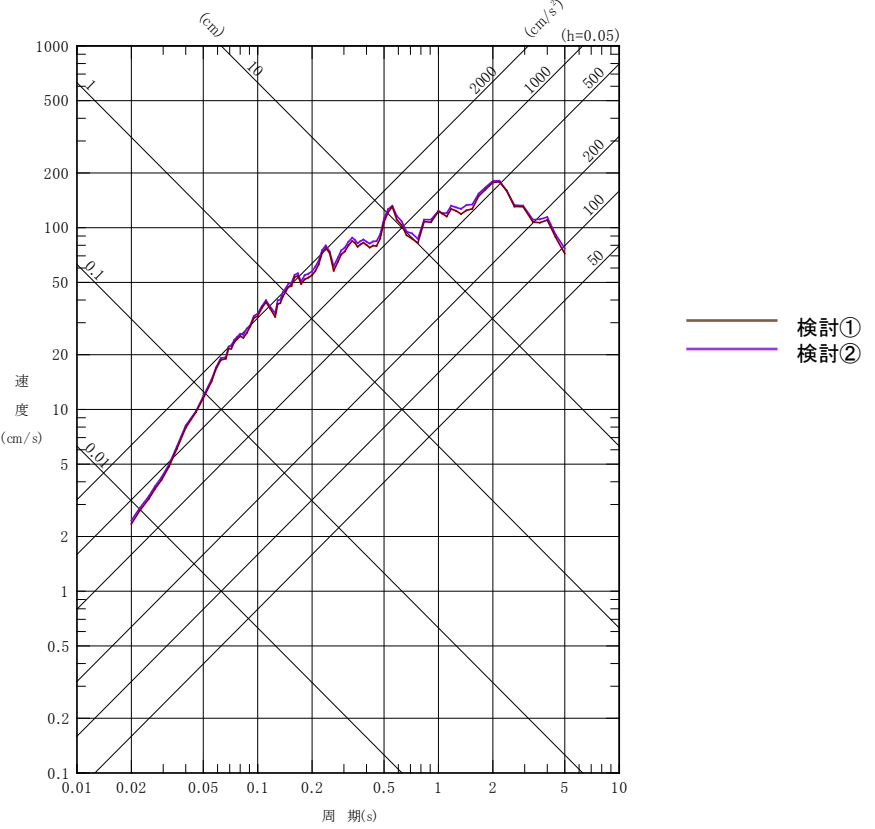
3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 解放基盤表面における地震動の比較(検討①及び検討②)

- 検討①と検討②の解放基盤表面の応答スペクトルを比較した結果を以下に示す。応答スペクトルのSI値は、水平方向及び鉛直方向ともに、検討②が大きく評価された。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動は検討②の結果に基づき**基準地震動 S_s-D との包絡関係を確認する。**

水平方向

	検討①	検討②
最大加速度 (cm/s ²)	735	768
SI値※1	129.5	134.3

※1 応答スペクトル強さ

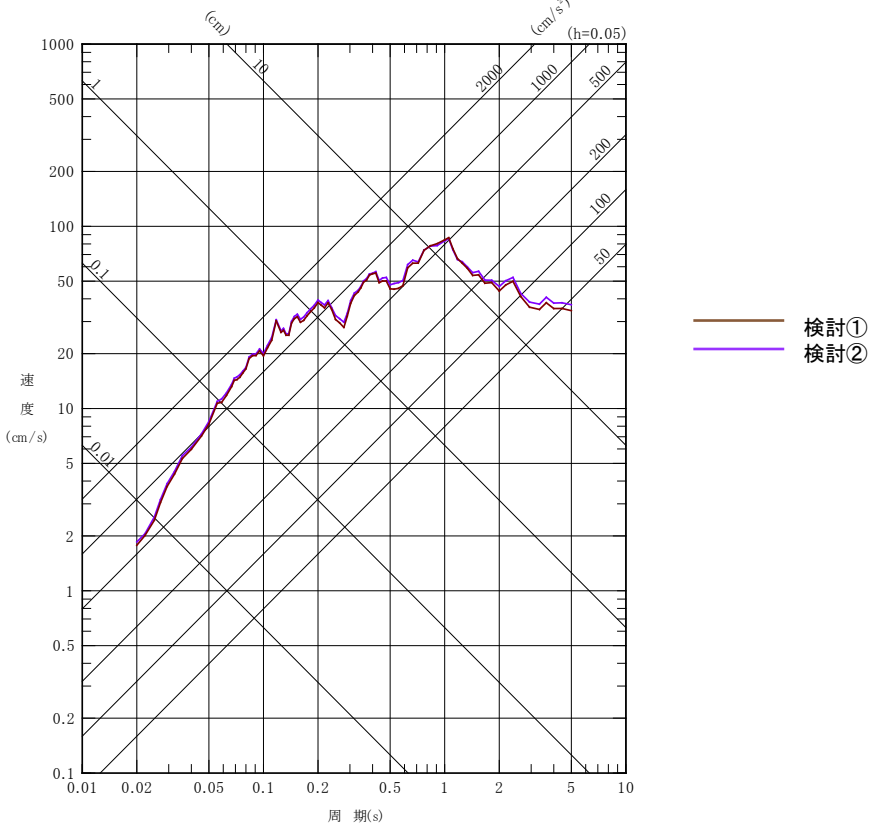


乱数位相による検討の解放基盤表面における応答スペクトル
水平方向

鉛直方向

	検討①	検討②
最大加速度 (cm/s ²)	560	583
SI値※2	60.0	61.2

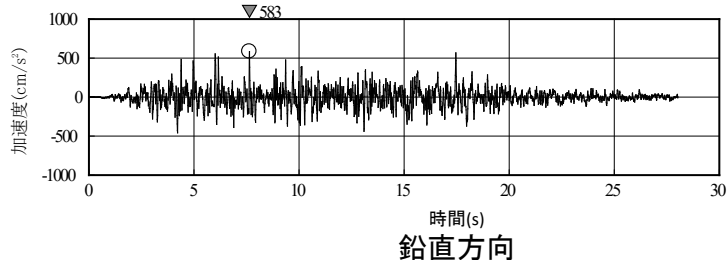
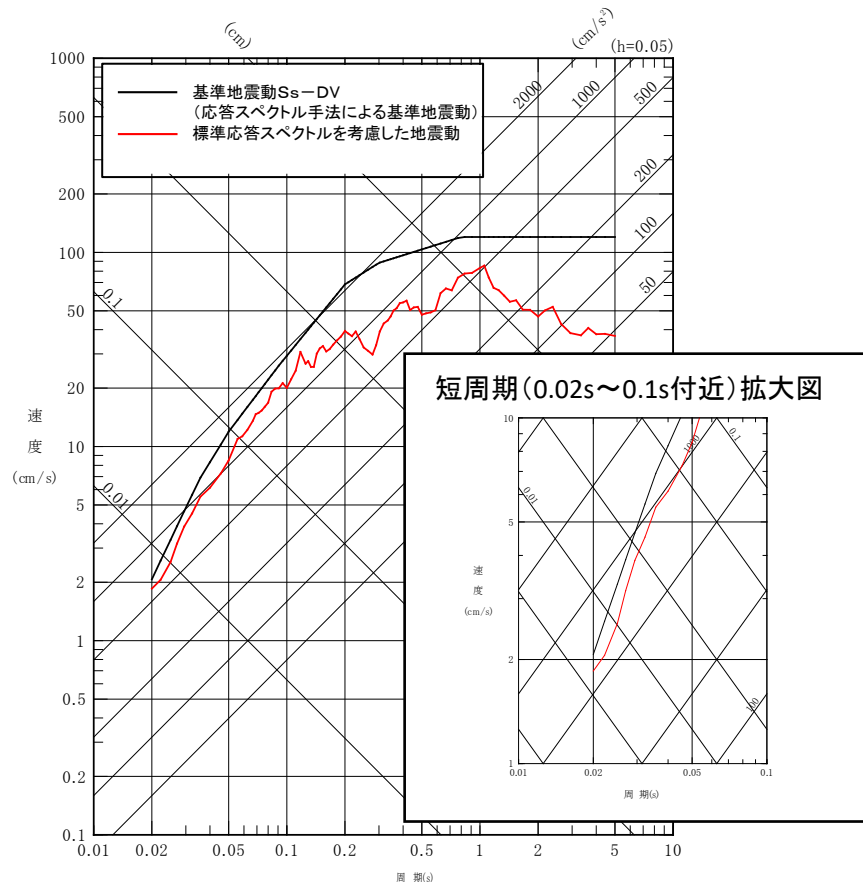
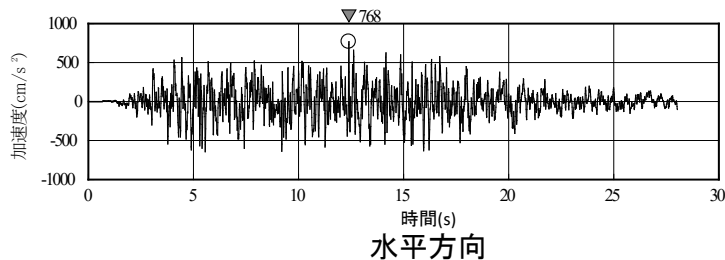
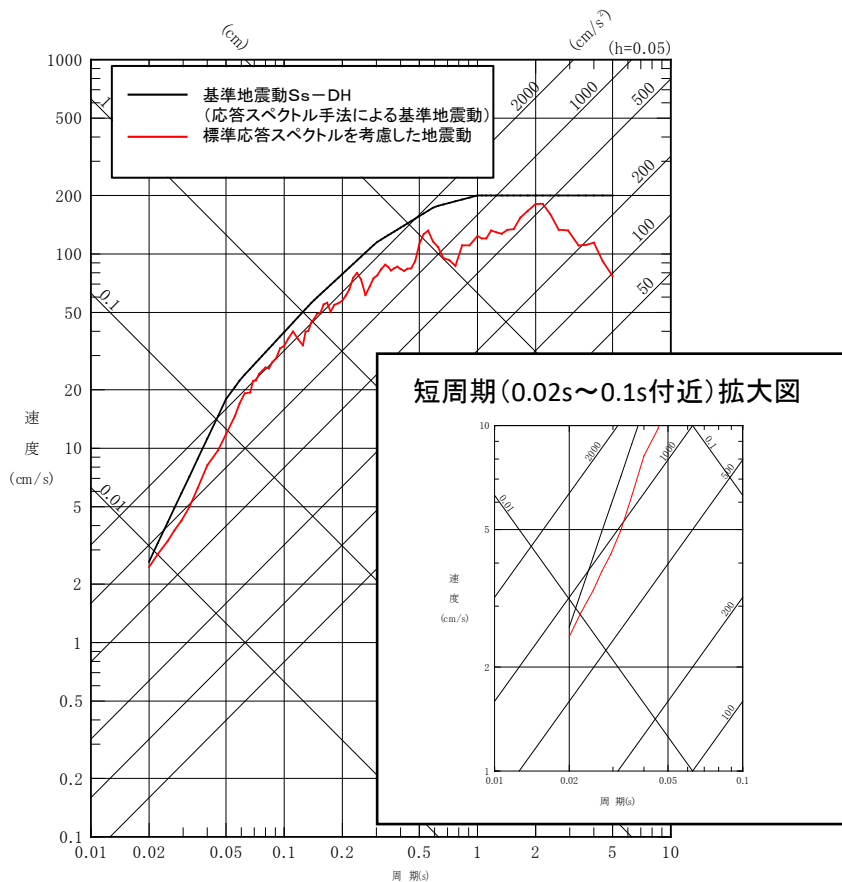
※2 応答スペクトル強さ



乱数位相による検討の解放基盤表面における応答スペクトル
鉛直方向

3. 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比較(基準地震動 S_s-D との比較)

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



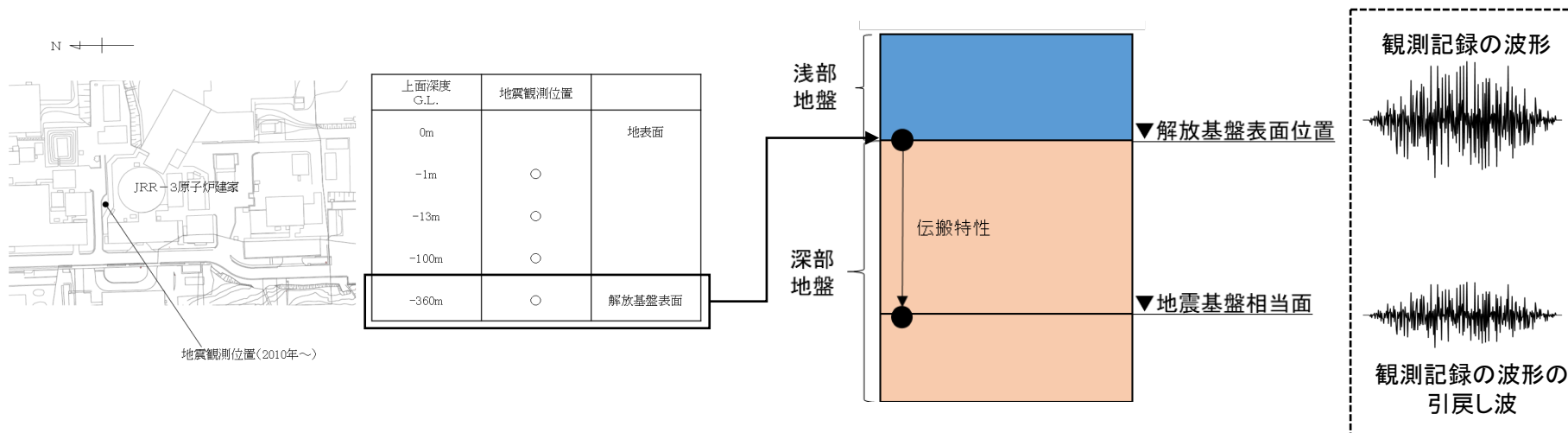
標準応答スペクトルを考慮した地震動は、全周期帯で基準地震動 S_s-D に包絡される。

【検討目的】

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

【検討方法】

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

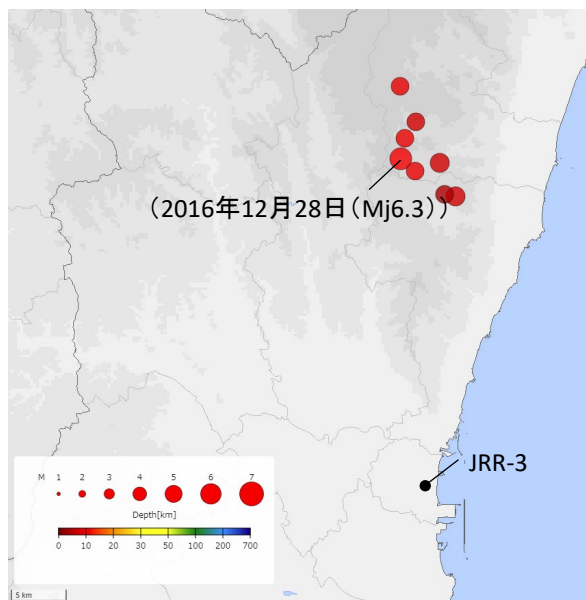


JRR-3 地震観測位置

引戻し解析のイメージ

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

- 標準応答スペクトルは、震源近傍の多数の地震動記録に基づき作成されている。標準応答スペクトルの作成の際、観測記録の収集・整理は、Kik-net観測点で整備された2000年以降に起きた震央距離30km以内、Mw5.0～6.6の内陸地殻内地震を対象とされている。
- 以上を踏まえ、「実位相による検討」に用いる検討対象地震として、JRR-3から震央距離約30kmの範囲にあるMw5.0～6.6の内陸地殻内地震を抽出した。



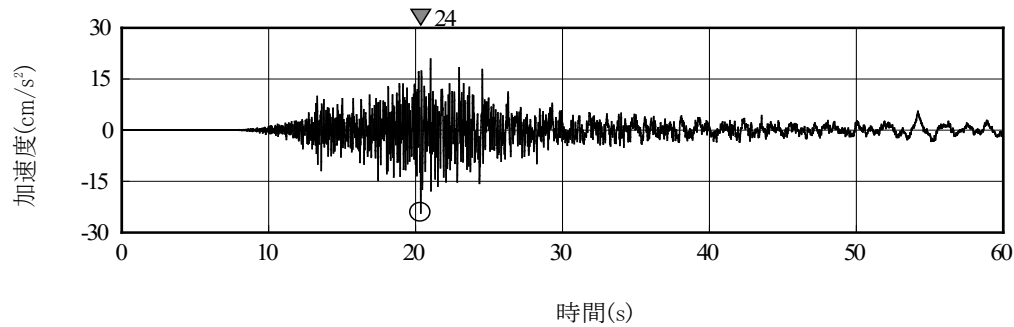
震央分布図

JRR-3で観測された内陸地殻内地震の観測記録
(震央距離約30kmの範囲にあるMw5.0～6.6の内陸地殻内地震)

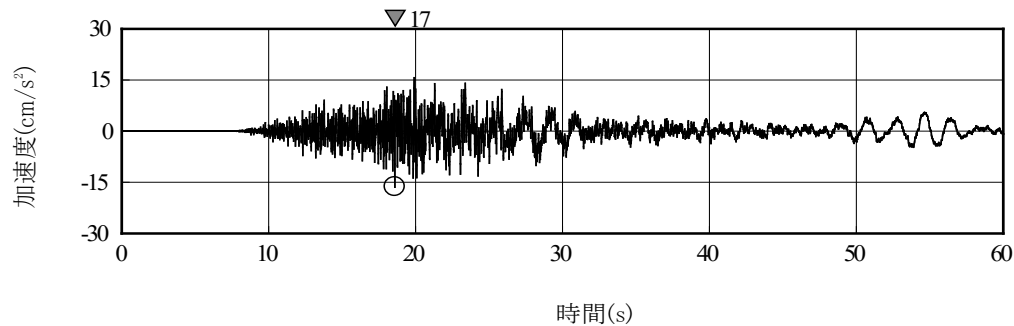
年	月	日	震央位置		深さ (km)	地震規模		震央距離 (km)	震央地名
			北緯	東経		Mj	Mw [※]		
2011	4	14	36° 46.7′	140° 34.3′	9	5.1	5.1	36	茨城県北部
2011	9	21	36° 44.2′	140° 34.6′	9	5.2	5.1	31	茨城県北部
2011	9	23	36° 41.5′	140° 37.0′	4	5.1	5.1	26	茨城県北部
2011	11	20	36° 42.6′	140° 35.2′	9	5.3	5.2	28	茨城県北部
2012	2	19	36° 45.0′	140° 35.3′	7	5.2	5.1	33	茨城県北部
2012	3	10	36° 43.0′	140° 36.7′	7	5.4	5.3	29	茨城県北部
2016	12	28	36° 43.2′	140° 34.4′	11	6.3	6.0	30	茨城県北部

※ $M_w = 0.78M_j + 1.08$

- 「実位相による検討」で用いる地震観測記録は、JRR-3で観測された内陸地殻内地震の観測記録の中で、マグニチュードが一番大きい茨城県北部の地震観測記録(2016年12月28日(Mj6.3))とする。
- 解放基盤表面位置(G.L.-0.360km)における茨城県北部の地震観測記録(2016年12月28日(Mj6.3))の加速度波形を以下に示す。



NS方向 0s~60s



UD方向 0s~60s

茨城県北部の地震観測記録(2016年12月28日(Mj6.3))の加速度波形
(JRR-3 G.L.-0.360km:解放基盤表面)

3. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 実位相による検討(引戻し解析で用いる地盤構造モデル)

- 観測記録の位相特性については、**浅部+深部地盤構造モデル**を用いて、敷地の解放基盤表面位置(G.L.-0.360km)の観測記録を地震基盤相当面(G.L.-0.997km)に引戻し解析を行い、引戻し解析により得られた地震基盤相当面における敷地の地震観測記録(地震動解析結果)の位相特性を用いる。

浅部+深部地盤構造モデル※1

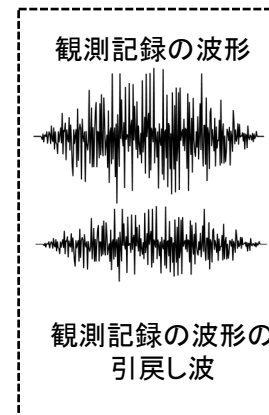
上面 G.L. (km)	層厚 (km)	密度 (g/cm ³)	水平方向		鉛直方向	
			S波速度 (km/s)	減衰定数	P波速度 (km/s)	減衰定数
0.000	0.001	1.97	0.192	0.732×f ^{-1.053}	0.504	0.546×f ^{-0.531}
-0.001	0.005	1.97	0.199		0.470	
-0.006	0.003	1.92	0.333		1.196	
-0.009	0.003	1.77	0.487	0.286×f ^{-1.478}	1.650	0.987×f ^{-1.081}
-0.012	0.001	1.82	0.559		1.603	
-0.013	0.017	1.82	0.483		1.764	
-0.030	0.070	1.73	0.494		1.967	
-0.100	0.110	1.73	0.542	0.061×f ^{-1.506}	1.825	0.408×f ^{-1.788}
-0.210	0.070	1.75	0.619		1.797	
-0.280	0.080	1.78	0.760		2.119	
-0.360	0.287	1.86	0.710	0.005	2.040	0.005
-0.647	0.327	2.11	1.200		2.610	
-0.974	0.009	2.24	1.500		3.100	
-0.983	0.014	2.42	2.000		3.950	
-0.997	0.013	2.57	2.500 ⇒ 2.200		4.800 ⇒ 4.290	
-1.010	3.790	2.66	2.900	5.490	0.0045×f ^{-0.69}	0.0045×f ^{-0.69}
-4.800	12.640	2.70	3.600	5.960		
-17.440	14.560	2.80	4.170	6.810		
-32.000	∞	3.20	4.320	7.640		

解放基盤表面位置

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

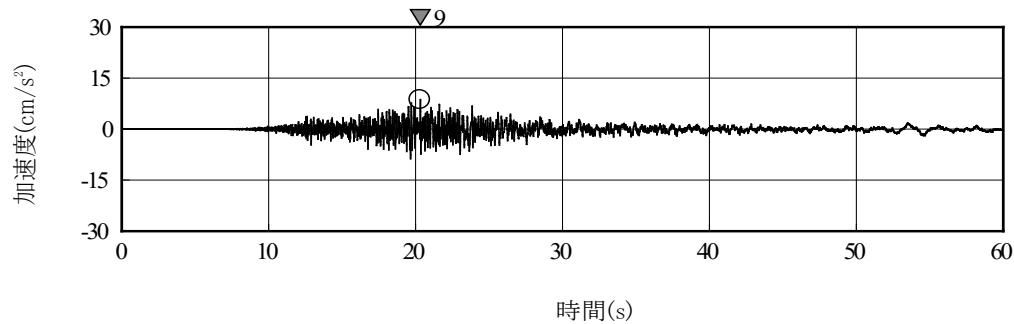
地震基盤相当面

Vs=2,200m/s, Vp=4,290m/s

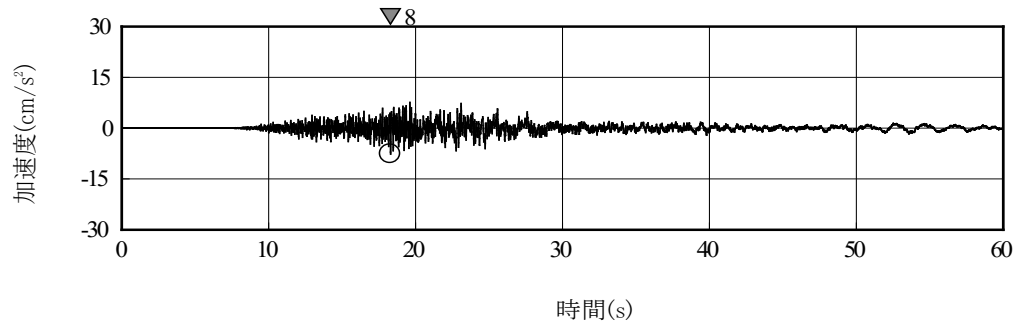


※1 浅部+深部地盤構造モデルは、原子力科学研究所 原子炉設置変更許可申請書[JRR-3原子炉施設等の変更]の一部補正の添付書類6(その8) 第5.5-2表 敷地の地盤構造モデル(浅部)～第5.5-3表 敷地の地盤構造モデル(深部)を用いて作成

- 引戻し解析により得られた地震基盤相当面における敷地の地震観測記録(地震動解析結果)を以下に示す。



NS方向 (引戻し解析結果)



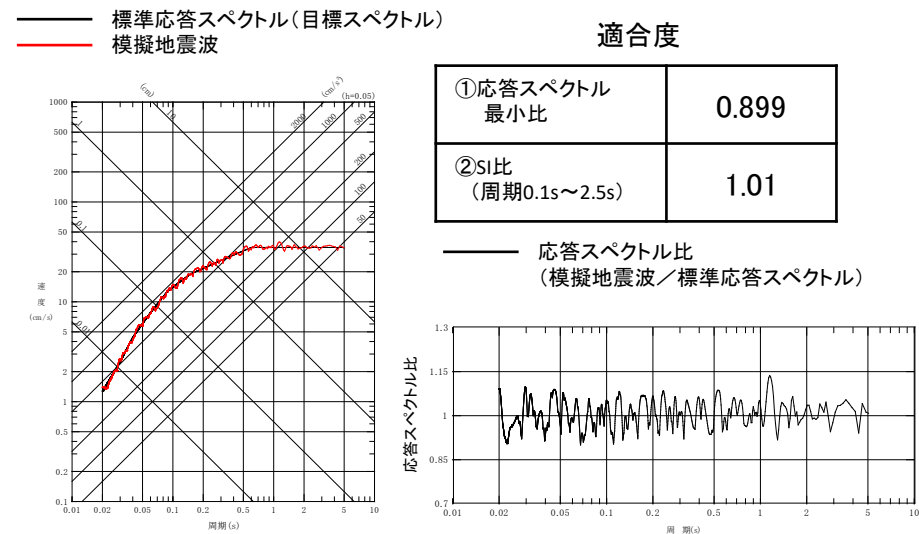
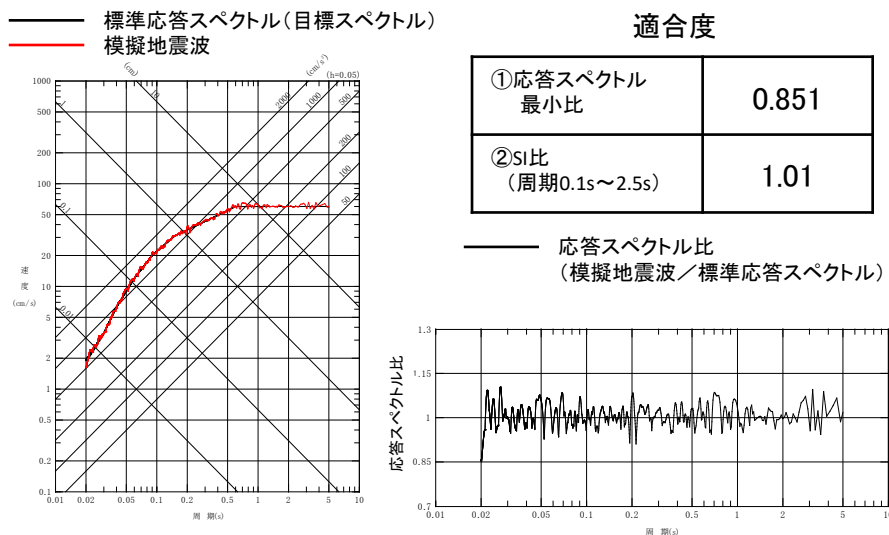
UD方向 (引戻し解析結果)

茨城県北部の地震観測記録(2016年12月28日(Mj6.3))の観測記録の引戻し解析結果の加速度波形
(JRR-3 G.L.- 0.997km:地震基盤相当面)

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

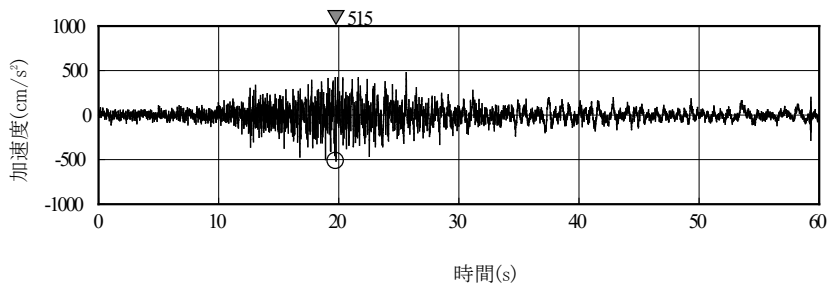
- 模擬地震波は、地震観測記録の位相特性を用い標準応答スペクトルと適合するように作成した。
- 作成した模擬地震波は「乱數位相による検討」の模擬地震波に比べ、フィッティングのばらつきが多少大きい結果となっているが、適合度の条件を満足している。

※適合度は、「乱數位相による検討」の模擬地震波と同じく、日本電気協会(2015)²⁾に基づき判定(p. 8参照)。



標準応答スペクトルと
模擬地震波の応答スペクトル

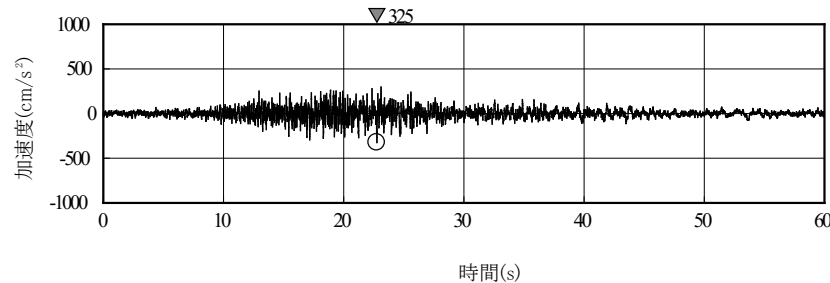
標準応答スペクトルに対する
模擬地震波の応答スペクトル比



水平方向

標準応答スペクトルと
模擬地震波と応答スペクトル

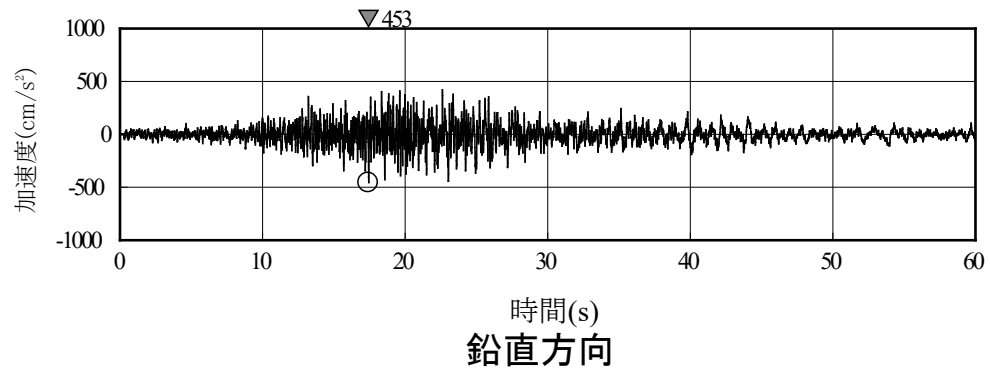
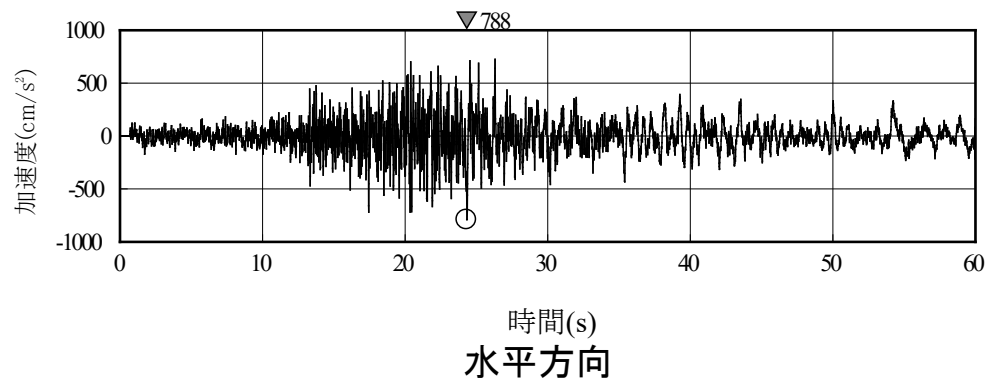
標準応答スペクトルに対する
模擬地震波の応答スペクトル比



鉛直方向

地震基盤相当面における実位相を用いた標準応答スペクトルに基づく模擬地震波(加速度波形)

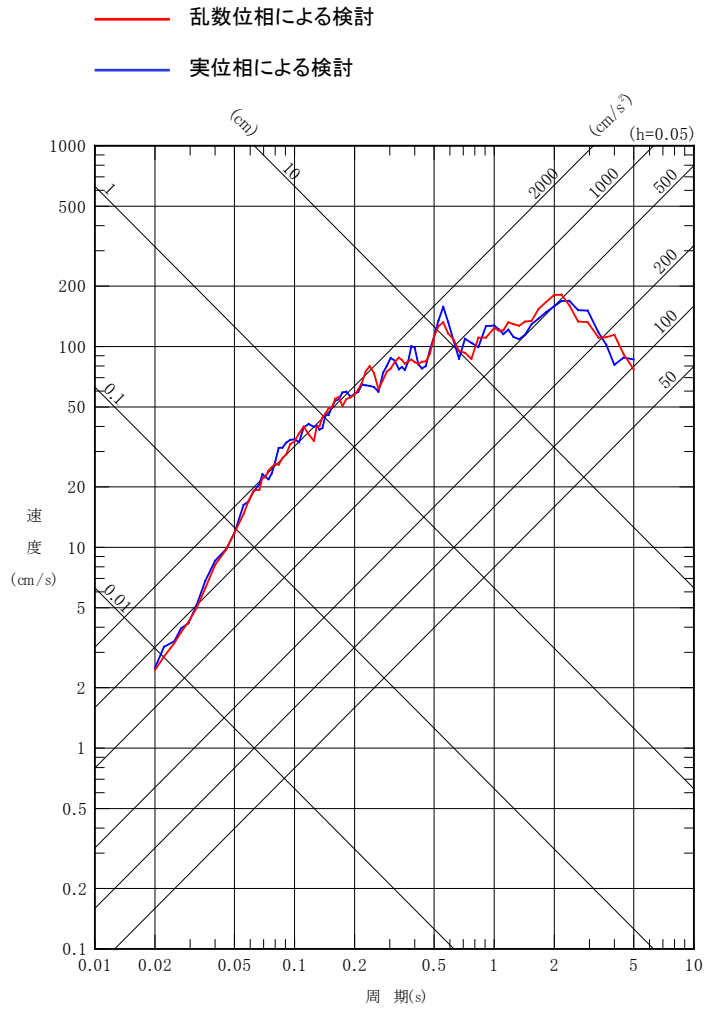
- 「乱数位相による検討」と同様に地盤応答解析を行い、解放基盤表面における地震動を評価した。結果を以下に示す。



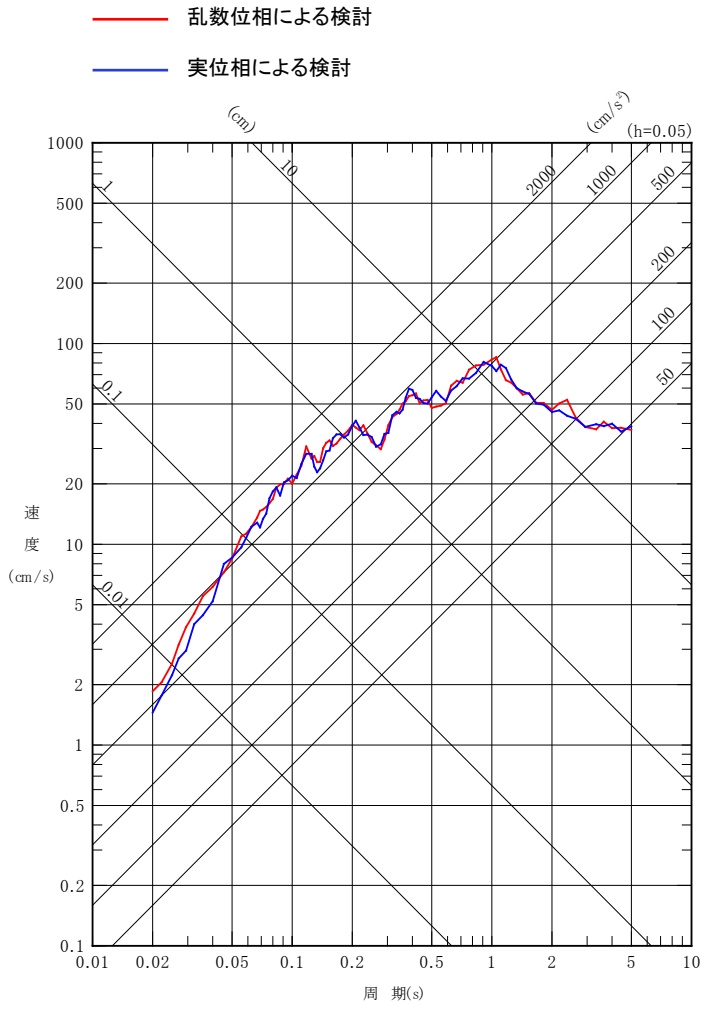
解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動(実位相による検討)

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

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



乱数位相による検討と実位相による検討の
解放基盤表面における応答スペクトル
水平方向



乱数位相による検討と実位相による検討の
解放基盤表面における応答スペクトル
鉛直方向

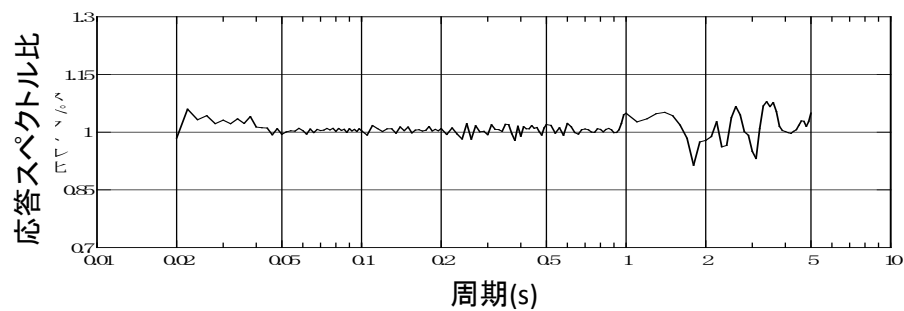
- 1) Shizuo Noda, Kazuhiko Yashiro, Katsuya Takahashi, Masayuki Takemura, Susumu Ohno, Masanobu Tohdo, Takahide Watanabe. RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES. OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis, Istanbul, 16-18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

補足資料

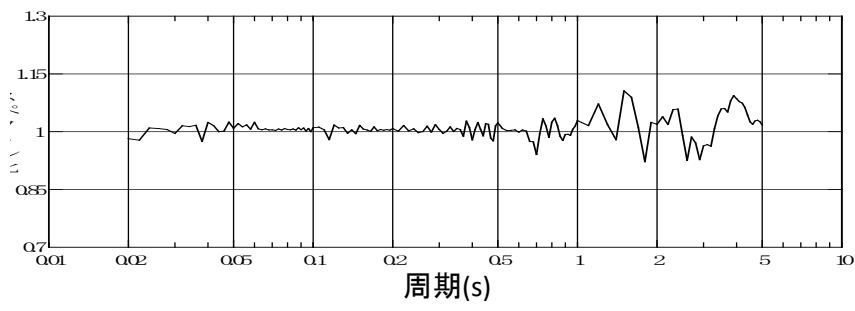
1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比

1. 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比

- 「乱数位相による検討」における模擬地震波について、施設の耐震評価に影響する短周期側の応答スペクトル比の適合度向上を目的とし、模擬地震波を見直した。
- 短周期側の0.02s~0.05sにおける標準応答スペクトルに対する模擬地震波に対する応答スペクトル比は、水平方向(1.06から1.01)、鉛直方向(1.02から1.01)に向上した。

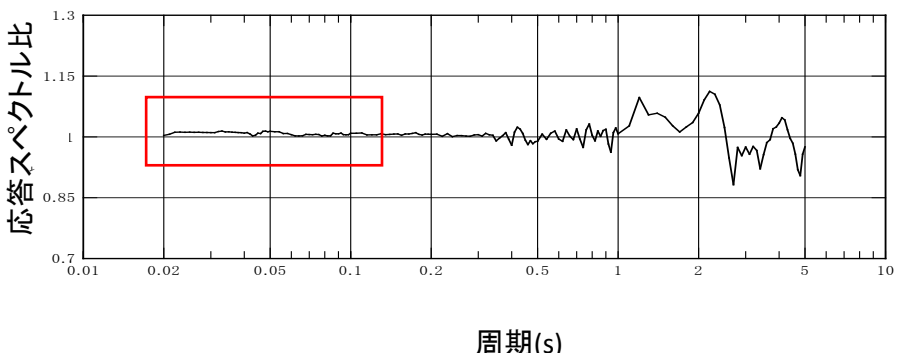


水平方向

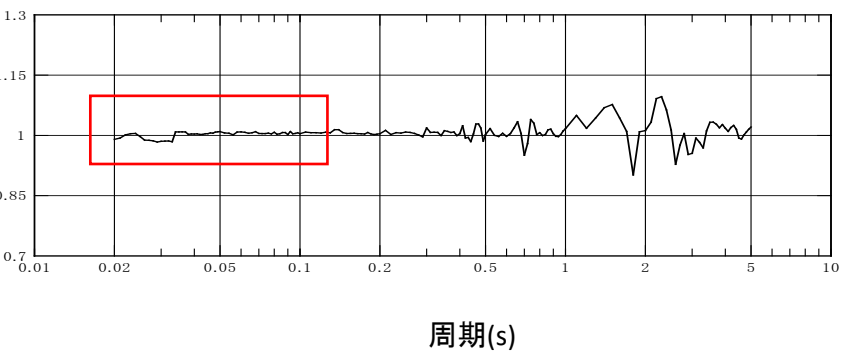


鉛直方向

標準応答スペクトルに対する応答スペクトル比(2021年9月3日審査会合)



水平方向



鉛直方向

標準応答スペクトルに対する応答スペクトル比(今回作成した応答スペクトル比)