

## 川内原子力発電所 1号炉及び2号炉

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における  
模擬地震波の作成及び基準地震動の策定について

2023年7月28日  
九州電力株式会社

# 目次

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール	P. 2
2. 模擬地震波の作成	P. 8
2.1 模擬地震波の作成方針	P. 9
2.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成	P. 11
2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成	P. 14
2.4 解放基盤表面の地震波の比較	P. 22
3. 基準地震動の策定	P. 28
4. 超過確率の参照	P. 34
5. まとめ	P. 37
【参考①】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認	P. 39



## 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

No.	コメント	指摘場所	対応状況
1	地下構造モデルの地盤減衰の設定について、既許可からの変更点の妥当性を説明すること。その際、EL. -28.5m~EL. -480mの層を分割していること、また、地盤減衰の設定根拠としている地震観測記録が得られていない範囲 (EL. -118.5m~EL. -200m) の地盤減衰の設定の妥当性についても併せて説明すること。	第983回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和3年6月11日)	第1026回会合、 第1103回会合にて説明
2	地下構造モデルの変更に伴う既許可の基準地震動への影響について説明すること。		第1026回会合、 第1103回会合にて説明
3	地震基盤相当面について、設置許可基準規則解釈別記2の $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上に対し、 $V_s=2,150\text{m/s}$ の層上面 (EL. -480m) に設定したことの妥当性を説明すること。		第1026回会合にて説明
4	模擬地震波の作成について、複数の方法から一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせを採用した妥当性を説明すること。		説明方針： 第1097回会合にて説明 コメント回答： 方針に基づく検討結果を 今回説明 (P22~P27)
5	既許可以降の観測・調査・分析などについて説明すること。		第1103回会合にて説明
6	変はんれい岩類について、地質層序と地質図の凡例の記載の考え方を説明すること。		第1049回会合にて説明
7	既許可の地下構造モデルと新たに設定した地下構造モデルの位置づけの記載を充実すること。	第1026回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年1月21日)	第1080回会合にて説明
8	新たに設定した地下構造モデルについて、以下を踏まえ、地盤減衰の設定の考え方、根拠を明確にし、説明すること。 ①15Hz程度までの範囲で評価した地盤減衰の高周波数帯への適用性 ②地震観測記録が得られていない深さにおける地盤減衰の設定 ③地盤減衰の不確かさの考え方		第1049回会合、 第1103回会合にて説明
9	地震基盤相当面は、設置許可基準規則解釈別記2の定義に従い $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上の層に設定すること。		第1057回会合にて説明
10	乱数位相を用いた模擬地震波の作成について、継続時間の設定を含め検討し、説明すること。		説明方針： 第1097回会合にて説明 コメント回答： 方針に基づく検討結果を 今回説明 (P11~P13)

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

No.	コメント	指摘場所	対応状況
11	地震動評価にあたって、どのような地下構造モデルを使うのか方針を示すこと。	第1049回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年5月20日)	第1057回会合にて説明
12	全体スケジュールを考慮した上で、地下構造モデル設定、地震動評価及び全体方針を示すこと。		第1057回会合にて説明
13	審査全体を見通した上で、スケジュールを示すこと。	第1057回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年7月1日)	第1080回会合にて説明
14	今回地下構造モデルの方針を変更していることから、説明済みとなっているコメントに関しても、改めて説明すること。		コメントNo. 1, 2, 8について 第1103回会合にて説明
15	新たなボーリング調査から得られる結果を踏まえ、設定した地下構造モデルの妥当性を示すこと。		第1103回会合にて説明
16	今後説明予定の新たに設定した地下構造モデルの妥当性について、適切な論理で十分な根拠に基づき説明すること。	第1080回、第1088回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年10月7日、 令和4年10月28日)	説明方針： 第1088回会合にて説明 コメント回答： 第1103回会合にて説明
17	審査事項に係る方針・考え方を準備ができたものから前倒しで説明する等、効果的かつ効率的な審査スケジュールを示すこと。  補正申請については、地下構造モデルと基準地震動の審議が取り纏まった段階で、部分的に補正するなど、限られた時間を活用する工夫を検討すること。	第1080回、第1088回 第1142回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年10月7日、 令和4年10月28日、 令和5年4月28日)	適宜説明

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

No.	コメント	指摘場所	対応状況
18	地下構造モデルについて、地震観測記録等に見られる一部の周期帯におけるピークが適切に評価できていないことを踏まえ、検討すること。	第1103回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年12月16日)	第1113回会合にて説明
19	川内の地下構造モデルの設定について、抜本的な改善を含めて現実的な方法で見直しを検討し、地下構造モデルの設定の方針を速やかに説明すること。	第1113回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和5年2月10日)	第1163回会合にて説明
20	地下構造モデルの見直し方針の説明では、単なる方針、速度構造を見直して観測事実と合わせ込むというだけでなく、既許可及びそれ以降の観測事実を踏まえた地下構造モデルの構築に係る論理構成、観測事実を再現できるという成立性とそれらの根拠を具体的に示すこと。	第1142回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和5年4月28日)	第1163回会合にて説明
21	以下について資料に反映すること。 ①EL. -200m以浅の地盤減衰に大きな保守性がある点について、わかりやすい説明になるようデータを資料に追加し、提示すること。 ②既許可モデルに見直した経緯について、端的な表現に見直すこと。	第1163回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和5年6月30日)	資料1-2にて説明

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

〔本日のご説明〕

今回、第1097回審査会合で示したコメント回答方針に基づき、以下の通り模擬地震波の作成結果をお示しするとともに、基準地震動の策定及び超過確率の参照についてご説明。

## ■ No. 10に対するコメント回答概要

- 第1097回審査会合において、乱数位相を用いた模擬地震波の作成については、Noda et al. (2002)による方法を採用することとし、継続時間が長めに設定されるよう保守的にM7.0として設定することを説明。(11頁)
- 今回、乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果を説明。(12～13頁)

## ■ No. 4に対するコメント回答概要

- 第1097回審査会合において、乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波について、解放基盤表面の地震波を作成し、時刻歴波形及び応答スペクトルについて比較・検討した上で、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる模擬地震波を設定することを説明。(22頁)
- 今回、2つの方法による解放基盤表面の地震波について、時刻歴波形及び応答スペクトルについて比較・検討した結果、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価には、乱数位相を用いた模擬地震波を用いることを説明。(23～27頁)





## 2. 模擬地震波の作成

## 2.1 模擬地震波の作成方針

### ■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる模擬地震波の作成方針

- 「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（以下、「審査ガイド」とする。）では、下記のように示されている。

震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトル（地震動レベル）に対して、地震動の継続時間及び振幅包絡線の経時的変化等の特性が適切に考慮されていることを確認する。また、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震動を作成する場合には複数の方法（例えば、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、実観測記録の位相を用いる方法等）により検討が行われていることを確認する。

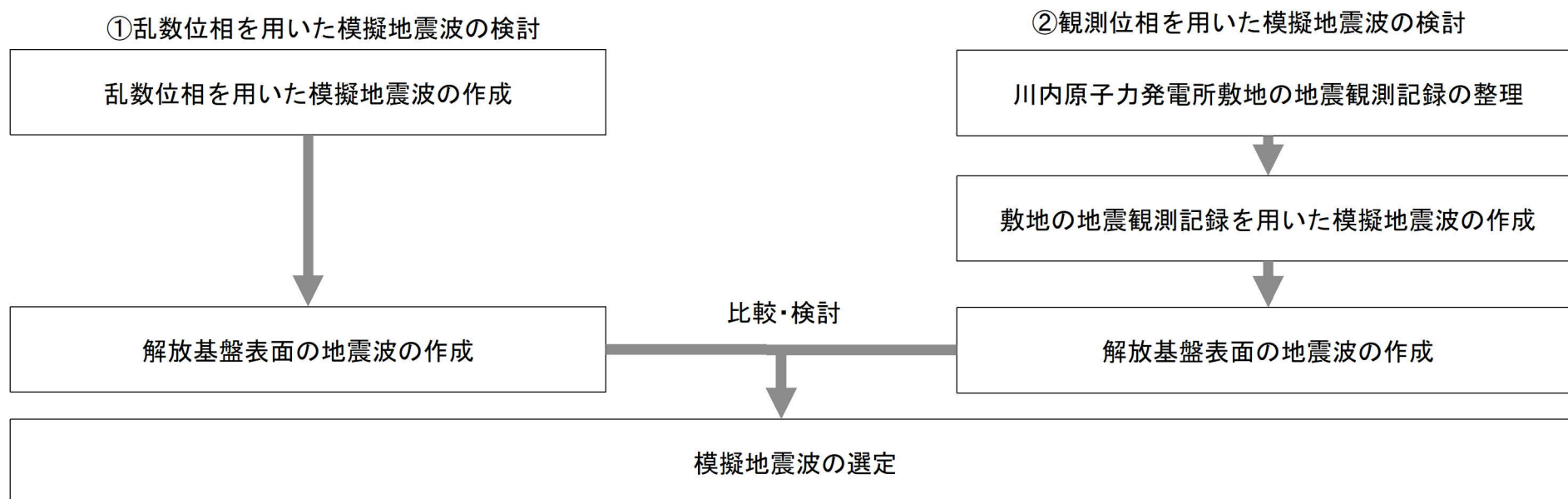
- 審査ガイドを踏まえて、以下の方針で模擬地震波を作成し、解放基盤表面における地震波を比較・検討した上で、「標準応答スペクトルを考慮した地震動」に用いる模擬地震波を設定する。

①正弦波の重ね合わせによる位相（乱数位相）を用いた模擬地震波（以下、乱数位相を用いた模擬地震波という。）

→Noda et al. (2002)の手法に基づき乱数位相を用いた模擬地震波を作成。

②実観測記録の位相を用いた模擬地震波（以下、観測位相を用いた模擬地震波という。）

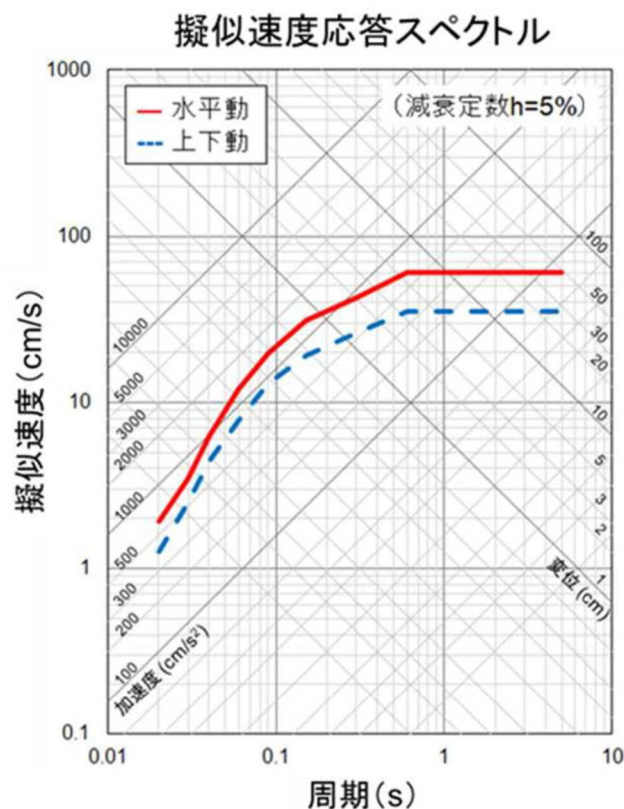
→川内原子力発電所敷地で得られた地震観測記録を整理し、実観測記録の位相を用いて模擬地震波を作成。



## 2.1 模擬地震波の作成方針

### ■ 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

- 複数の方法による検討では、「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」に記載された標準応答スペクトルに適合するように地震基盤相当面における模擬地震波を作成する。
- また、模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度は、日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足させることで確認する。



コントロールポイント

周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Q 値	
解放基盤表面	-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100
	-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100
	-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200
地震基盤相当面	-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200
	-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300
	-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300
	-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500
	-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500

地震基盤相当面における標準応答スペクトル  
 (「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」より抜粋)

## 2.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

- 地震基盤相当面での乱数位相を用いた模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al. (2002) による振幅包絡線の経時的变化を採用し、下記の条件でマグニチュードM及び等価震源距離 $X_{eq}$ を設定した上で、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。

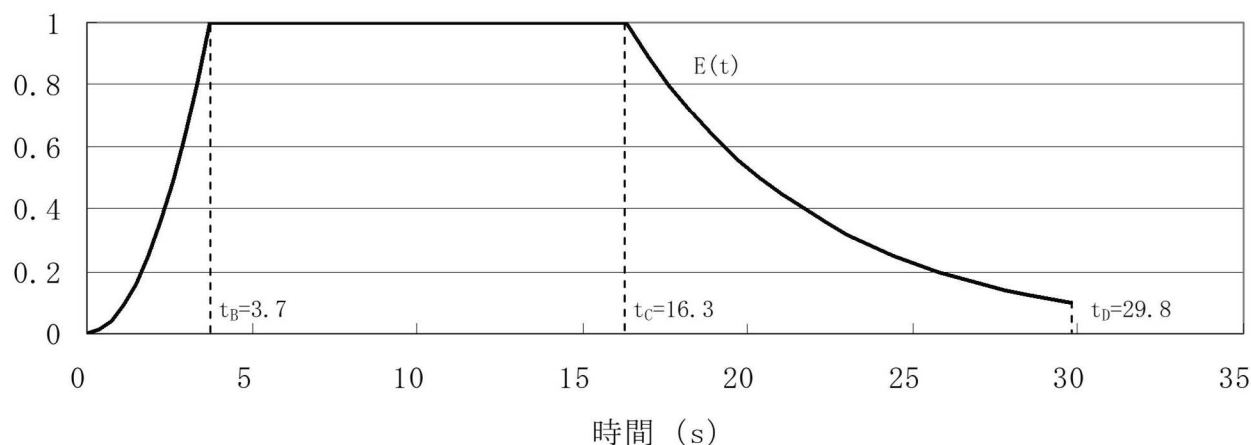
マグニチュード M:

審査ガイドにおける「全国共通に考慮すべき地震動」の地震規模は、Mw6.5程度未満と記載されている。武村(1990)の $M_0$ -M関係及びKanamori (1977)の $M_0$ -Mw関係によりMw6.5をMに換算するとM6.9となる。審査ガイドでは「Mw6.5程度未満」と幅をもって示されていることから、換算式から求められるMについても幅を持たせ、模擬地震波の主要動の継続時間が長めとなるよう保守的にM7.0として設定。

等価震源距離  $X_{eq}$ :

等価震源距離は震源近傍を想定し、 $X_{eq}=10\text{km}$ として設定。

模擬地震波	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的变化 (s)		
		$t_B$	$t_C$	$t_D$
水平	29.8	3.7	16.3	29.8
鉛直	29.8	3.7	16.3	29.8



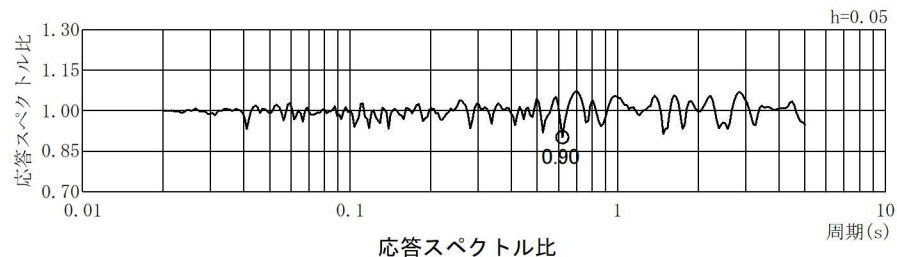
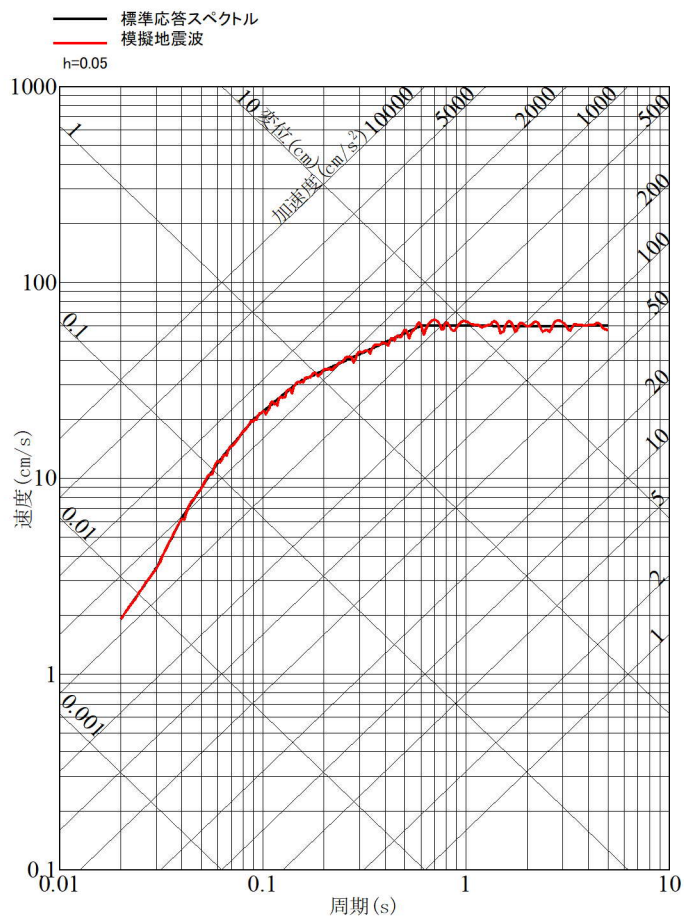
$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & (0 < t \leq t_B) \\ 1.0 & (t_B < t \leq t_C) \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C}(t - t_C)} & (t_C < t \leq t_D) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} t_B &= 10^{0.5M - 2.93} \\ t_C - t_B &= 10^{0.3M - 1.0} \\ t_D - t_C &= 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \end{aligned}$$

## 2.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（水平方向）

- 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（水平方向）を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足することを確認した。



	作成結果
①応答スペクトル比R(T)	0.90 ≥ 0.85
②SI比	1.00 ≥ 1.00

$$\textcircled{1} \quad R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

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

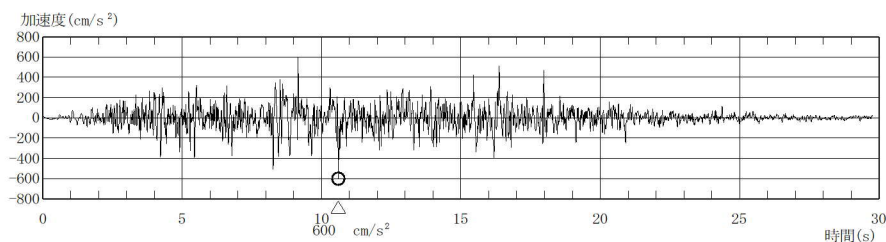
$$\textcircled{2} \quad \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

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(cm/s)

$\bar{S}_v(T)$  : 目標とする応答スペクトル(cm/s)

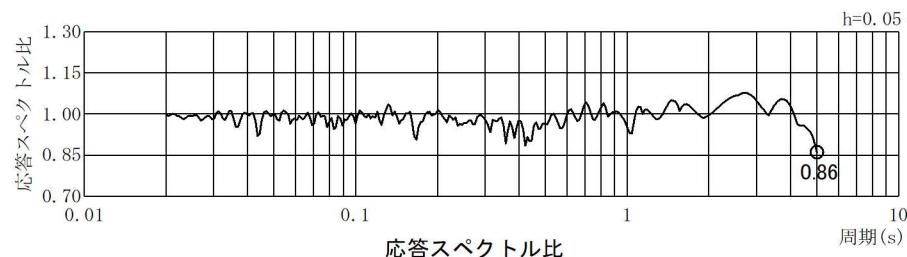
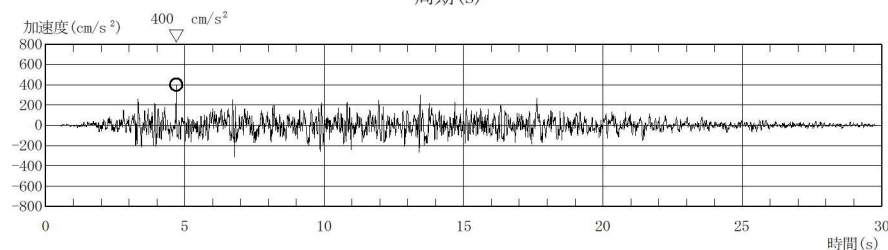
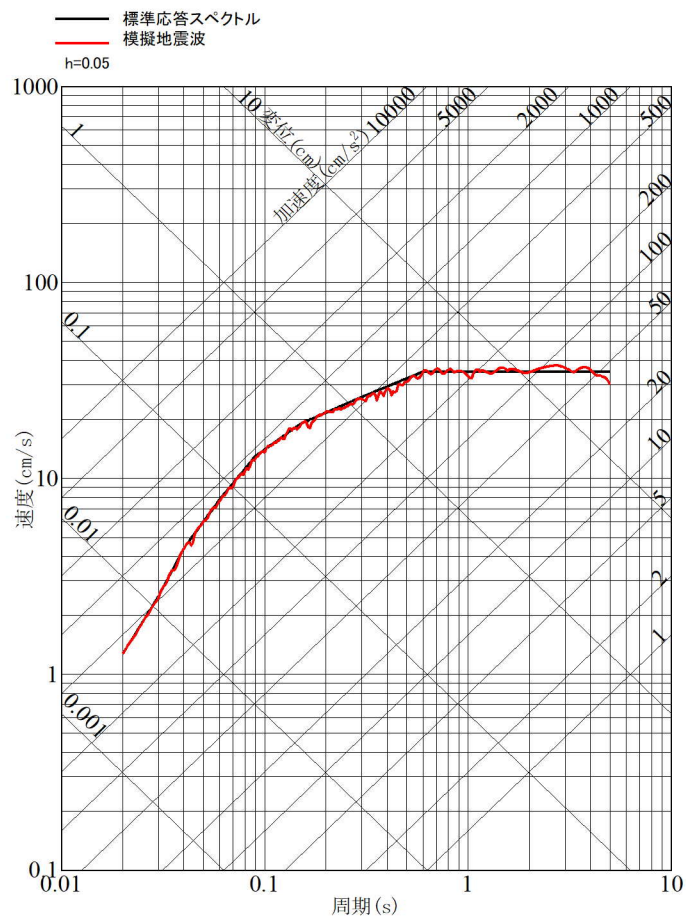
T : 固有周期(s)



## 2.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（鉛直方向）

- 乱数位相を用いた模擬地震波の作成結果（鉛直方向）を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足することを確認した。



	作成結果
① 応答スペクトル比 R(T)	0.86 ≥ 0.85
② SI比	1.01 ≥ 1.00

$$\textcircled{1} \quad R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

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

$$\textcircled{2} \quad \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

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 (cm/s)

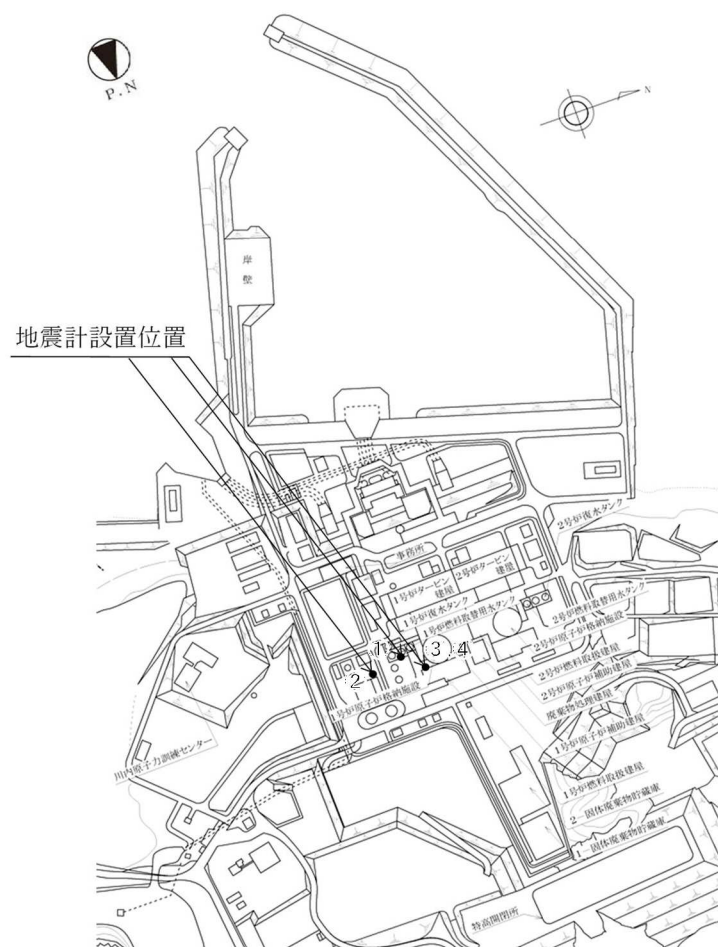
$\bar{S}_v(T)$  : 目標とする応答スペクトル (cm/s)

T : 固有周期 (s)

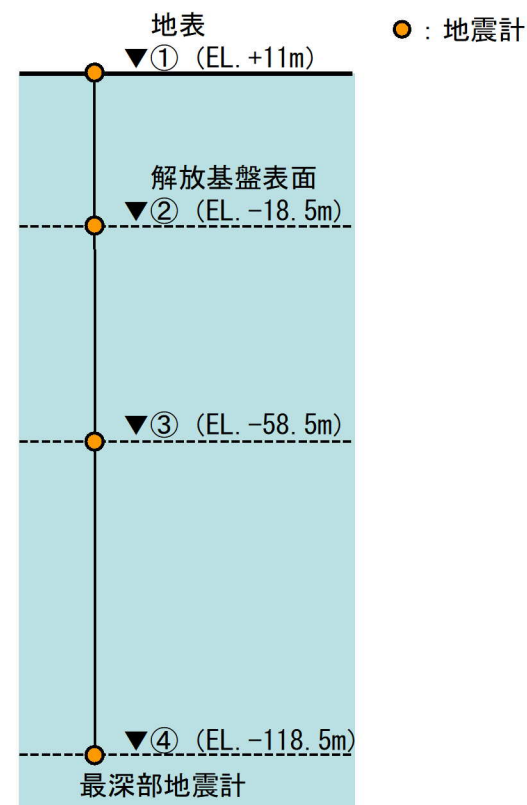
## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集条件（1 / 2）

- 川内原子力発電所の敷地地盤では、原子炉建屋周辺において、鉛直アレイ地震観測を実施している。
- 地震基盤相当面での観測位相を用いた模擬地震波の作成にあたっては、敷地の地震計で得られた観測記録（EL. +11m）を用いる。



敷地の鉛直アレイ地震計平面配置図

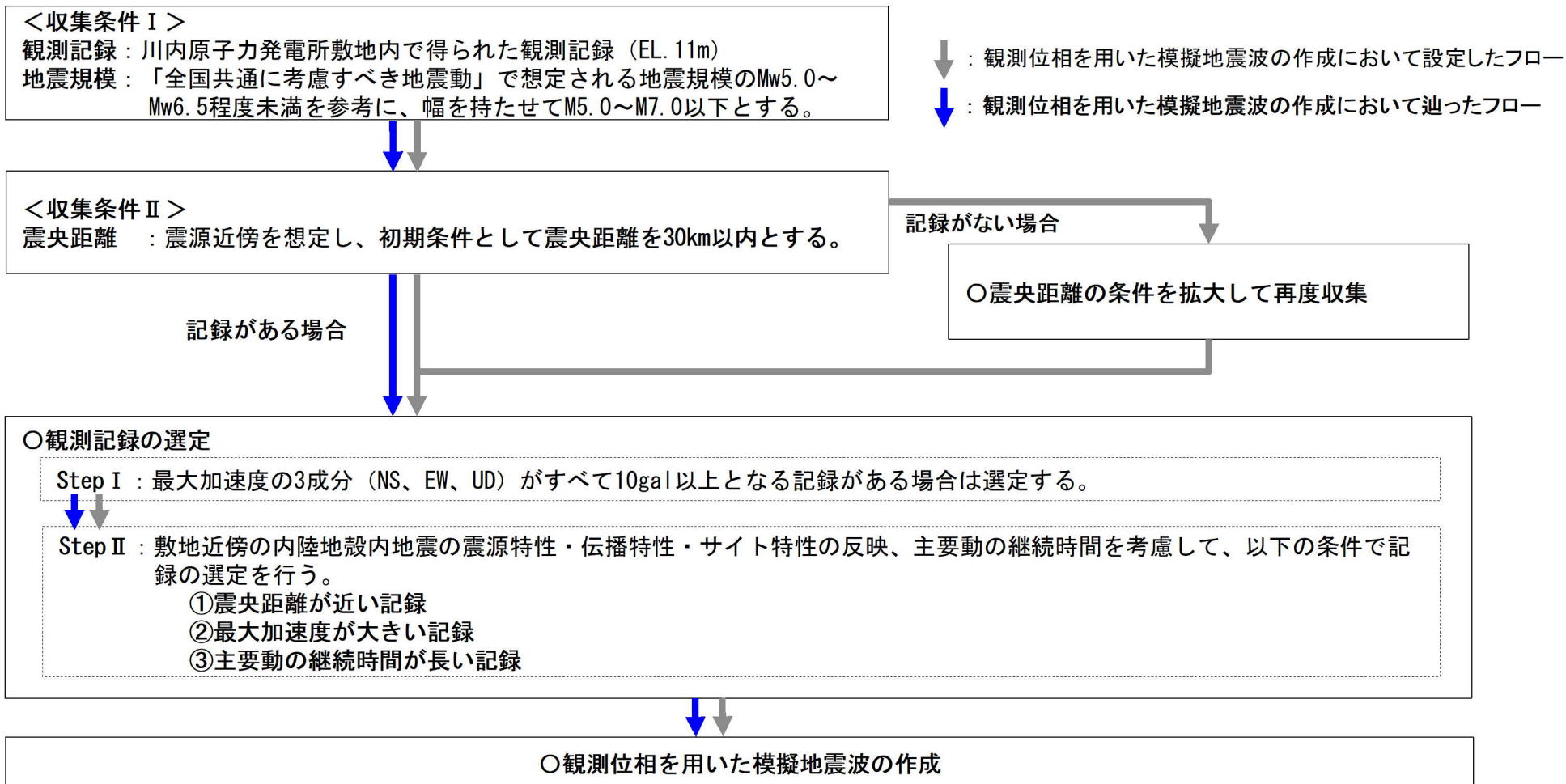


敷地の鉛直アレイ地震計断面位置

## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集条件（2 / 2）

- 観測位相を用いた模擬地震波は、下記のフローに従い川内原子力発電所の敷地地盤で得られた観測記録の位相を与えて作成する。
  - 観測位相を用いた模擬地震波には敷地地盤の振動特性を適切に反映することが必要と考えられることから、下記の条件により敷地近傍で発生した内陸地殻内地震の観測記録を収集する。記録が得られていない場合は、対象範囲を拡大した上で観測記録を収集する。
  - 収集した記録が複数ある場合には適切に選定し、観測位相を用いた模擬地震波を作成する。



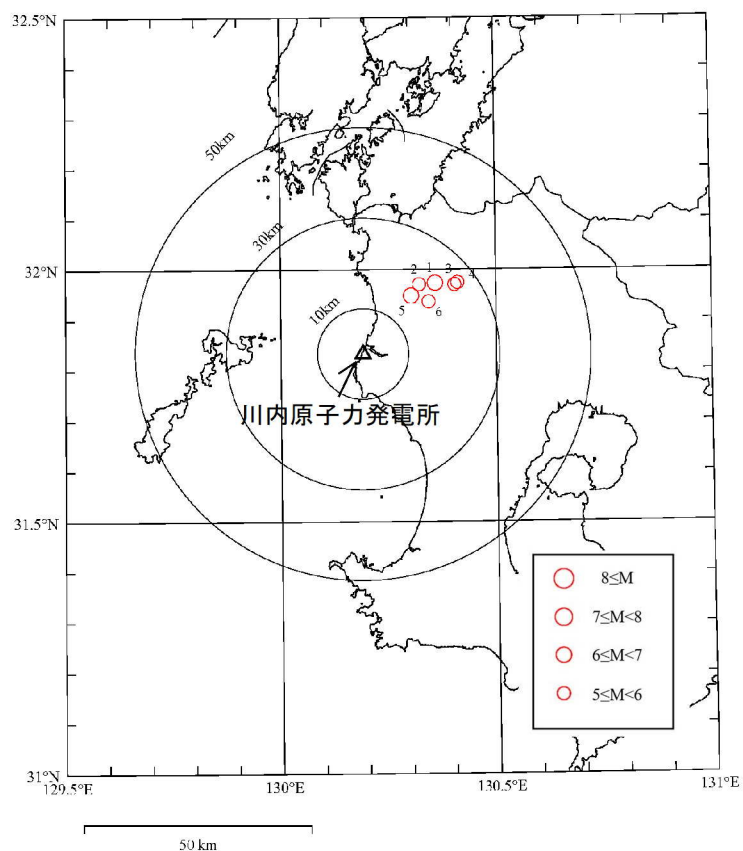
観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集・選定フロー



## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 敷地における地震観測記録の収集及び選定（収集条件Ⅰ，Ⅱ及び観測記録の選定 StepⅠ）

- 川内原子力発電所の敷地において、マグニチュード5.0以上で震央距離30km以内の内陸地殻内地震の観測記録は6地震得られている。6地震の震央分布図と諸元を示す。
- そのうちNS、EW、UD方向すべてが10gal以上となる地震は3地震となる。
- なお、6地震の観測記録については、特異な位相特性をもつ記録がないことを確認。



収集した6地震の震央分布図

収集した6地震の諸元

地震No.	発生年月日・時刻					地名	北緯		東経		震源深さ(km)	M	震央距離(km)	最大加速度(gal)			最大加速度(3成分)10gal以上判定
	年	月	日	時	分		度	分	度	分				NS	EW	UD	
1	1997	3	26	17	31	鹿児島県北西部	31	58.37	130	21.54	11.9	6.6	22.2	90.1	69.4	39.4	○
2	1997	4	3	4	33	鹿児島県北西部	31	58.22	130	19.32	14.8	5.7	19.7	60.7	60.3	22.7	○
3	1997	4	5	13	24	鹿児島県北西部	31	58.21	130	24.22	12.0	5.2	25.3	11.4	11.3	4.7	除外
4	1997	4	9	23	20	鹿児島県北西部	31	58.41	130	24.66	10.5	5.1	26.0	12.3	7.8	4.6	除外
5	1997	5	13	14	38	鹿児島県北西部	31	56.90	130	18.16	9.2	6.4	16.6	102.3	98.0	66.7	○
6	1997	5	14	8	32	鹿児島県北西部	31	56.16	130	20.65	8.9	5.1	18.5	6.6	4.3	2.4	除外

## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 敷地における地震観測記録の収集・選定（観測記録の選定 Step II）

- Step I で選定された3地震について、①震央距離、②最大加速度、③主要動の継続時間について比較・検討する。
- ①震央距離が最も近く、②最大加速度が最も大きいのは「No. 5 1997年5月13日 鹿児島県北西部の地震 (M6.4)」。
- ③主要動の継続時間は、NS、EW、UDの3成分で比較すると、「No. 1 1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (M6.6)」が最も長い。
- 以上より、「No. 1 1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (M6.6)」及び「No. 5 1997年5月13日 鹿児島県北西部の地震 (M6.4)」の2地震を、観測位相を用いた模擬地震波に用いる記録として選定する。

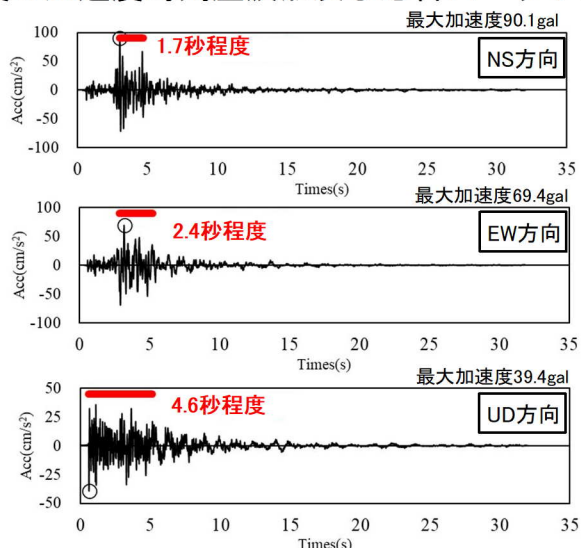
No.	地震名	地震規模 M	①震央距離 (km)	②最大加速度 (gal)	③主要動継続時間※ (秒)			実観測位相の選定
					NS	EW	UD	
1	1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 本震)	6.6	22.2	90.1	<u>1.7</u>	<u>2.4</u>	<u>4.6</u>	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が最も長い
2	1997年4月 3日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 余震)	5.7	19.7	60.7	0.6	0.6	1.1	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が短い
5	1997年5月13日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 本震)	6.4	<u>16.6</u>	<u>102.3</u>	1.5	1.5	3.5	①震央距離が最も近い ②最大加速度が最も大きい ③主要動の継続時間が短い

※最大加速度の0.5倍以上の振幅の継続時間を主要動の継続時間として評価。

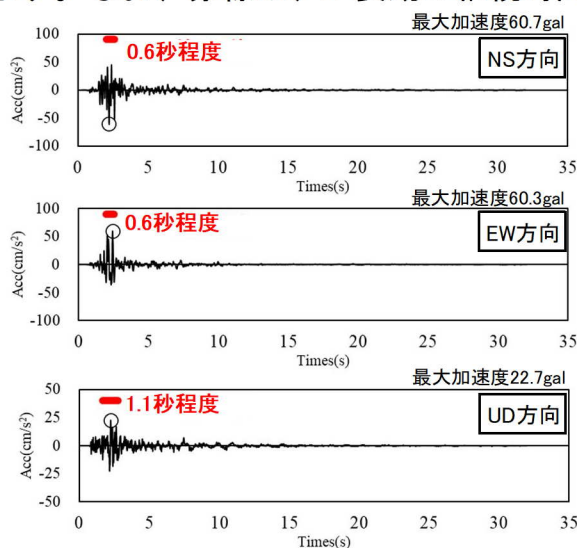
## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 収集・選定された地震観測記録（加速度時刻歴波形・応答スペクトルの比較）

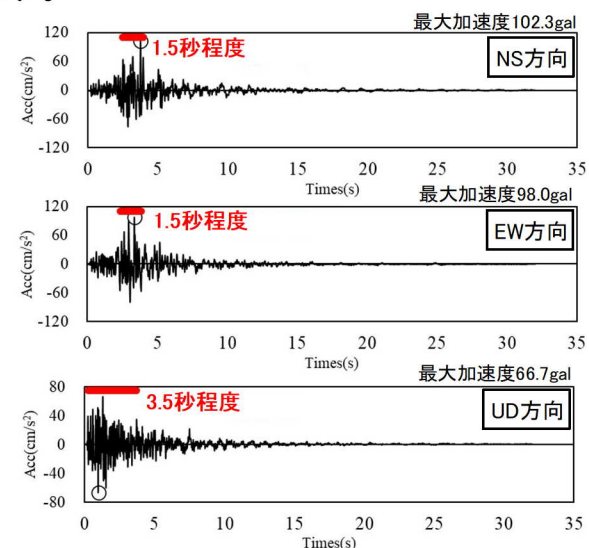
- 3地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。なお、赤線は、主要動の継続時間を示す。



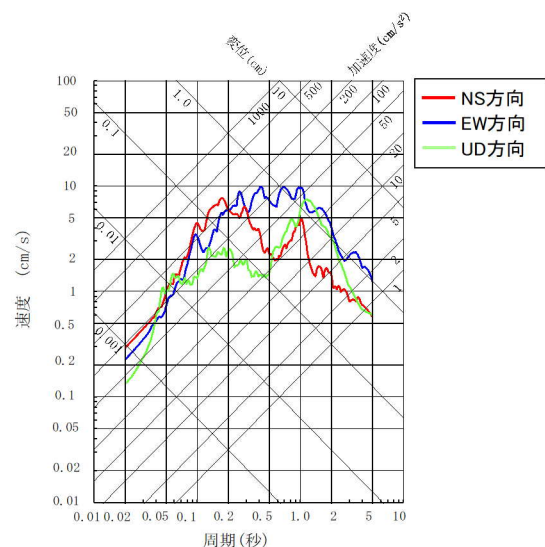
No.1 1997年03月26日 鹿児島県北西部 (M6.6)



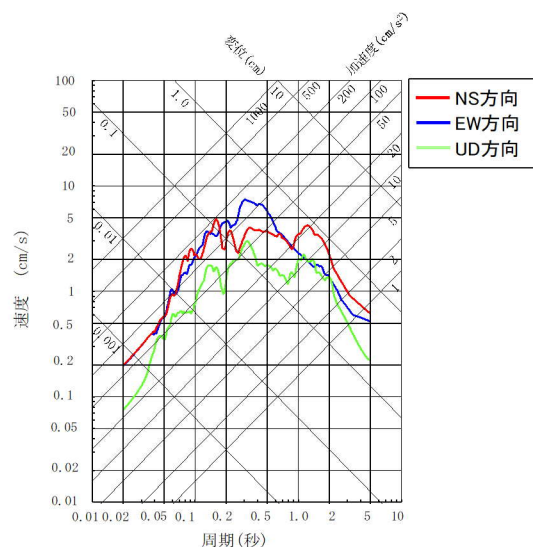
No.2 1997年04月03日 鹿児島県北西部 (M5.7)



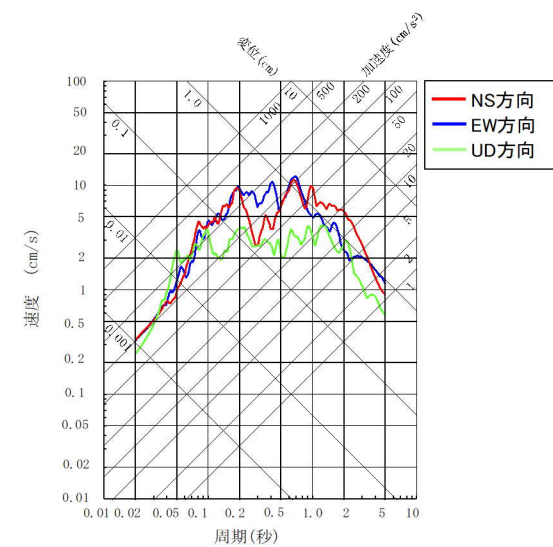
No.5 1997年05月13日 鹿児島県北西部 (M6.4)



No.1 1997年03月26日  
鹿児島県北西部 (M6.6)



No.2 1997年04月03日  
鹿児島県北西部 (M5.7)

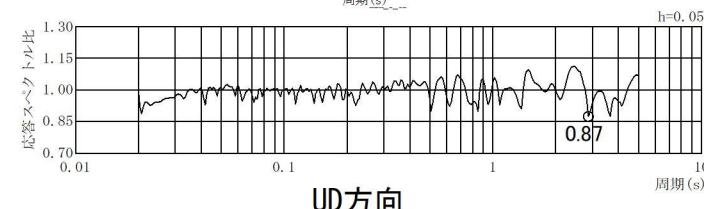
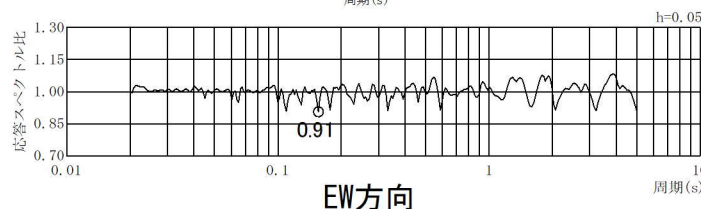
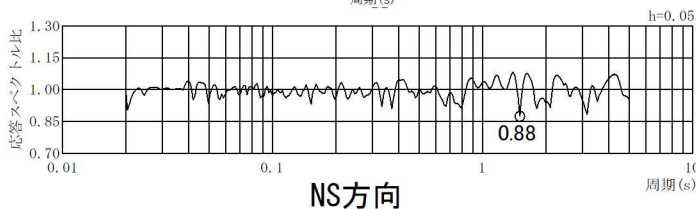
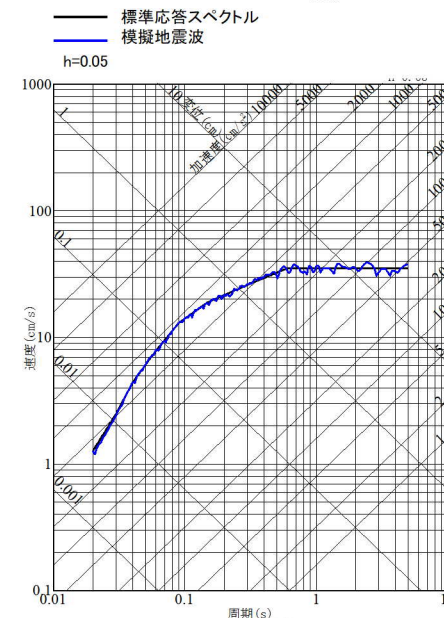
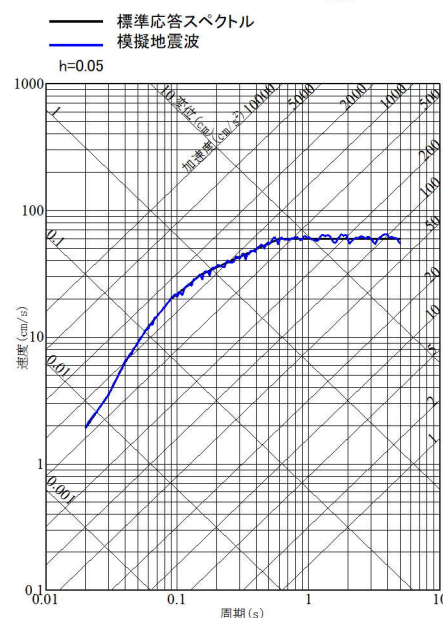
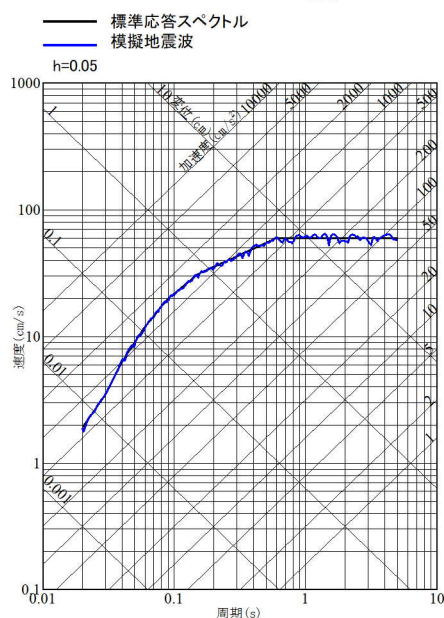
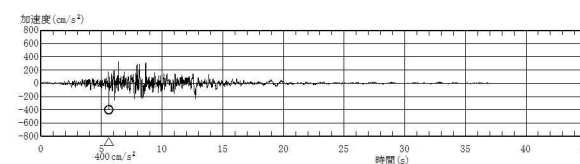
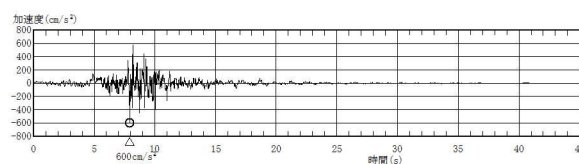
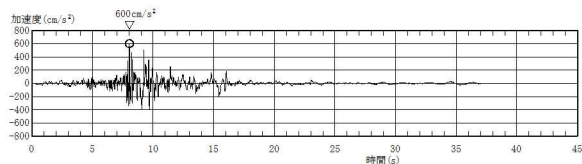


No.5 1997年05月13日  
鹿児島県北西部 (M6.4)

## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 模擬地震波の作成結果 (No1. 1997年3月26日の地震)

- 観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトル及び時刻歴波形を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足することを確認した。

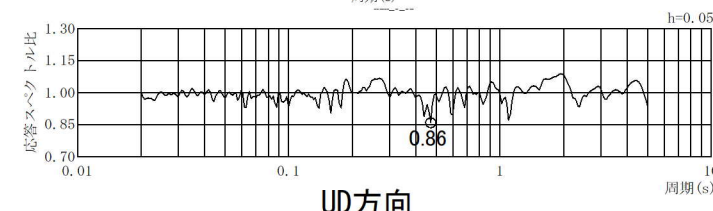
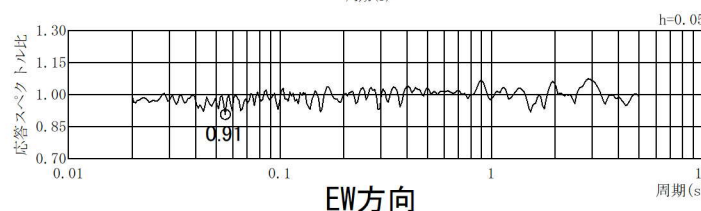
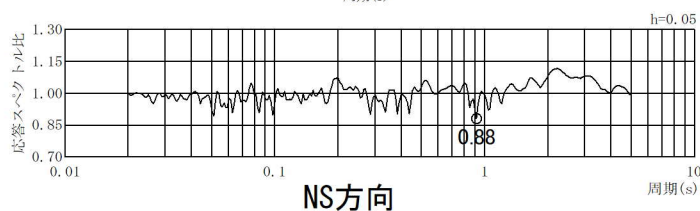
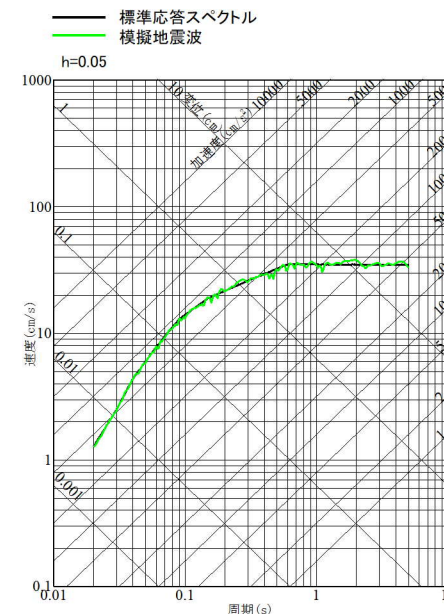
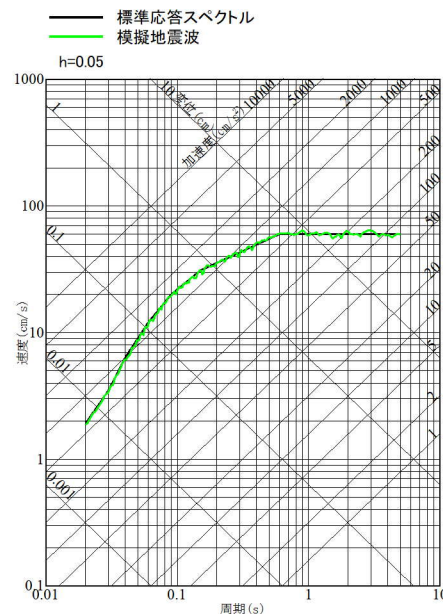
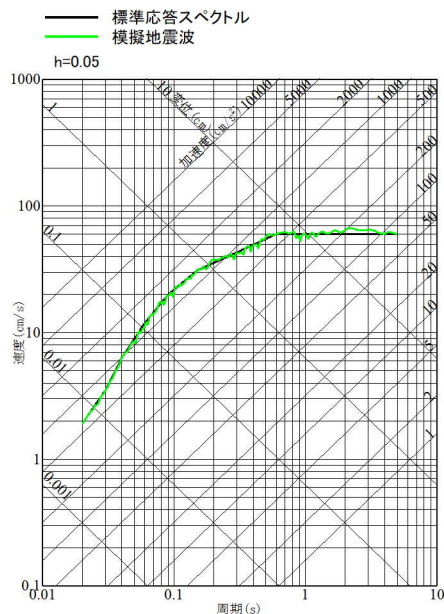
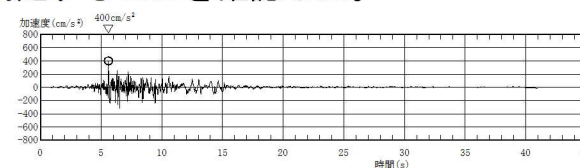
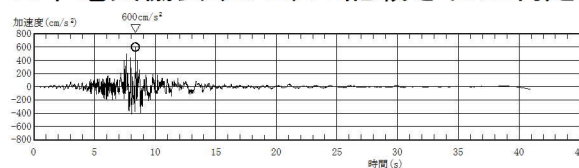
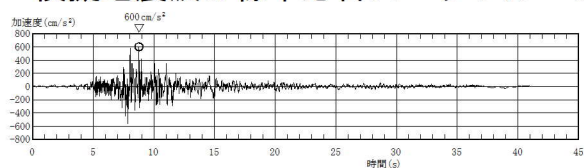


作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
①応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85	0.91 ≥ 0.85	0.87 ≥ 0.85
②SI比	1.00 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00

## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 模擬地震波の作成結果 (No5. 1997年5月13日の地震)

- 観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトル及び時刻歴波形を以下に示す。
- 模擬地震波の標準応答スペクトルへの適合度が日本電気協会(2015)に記載された判定基準を満足することを確認した。

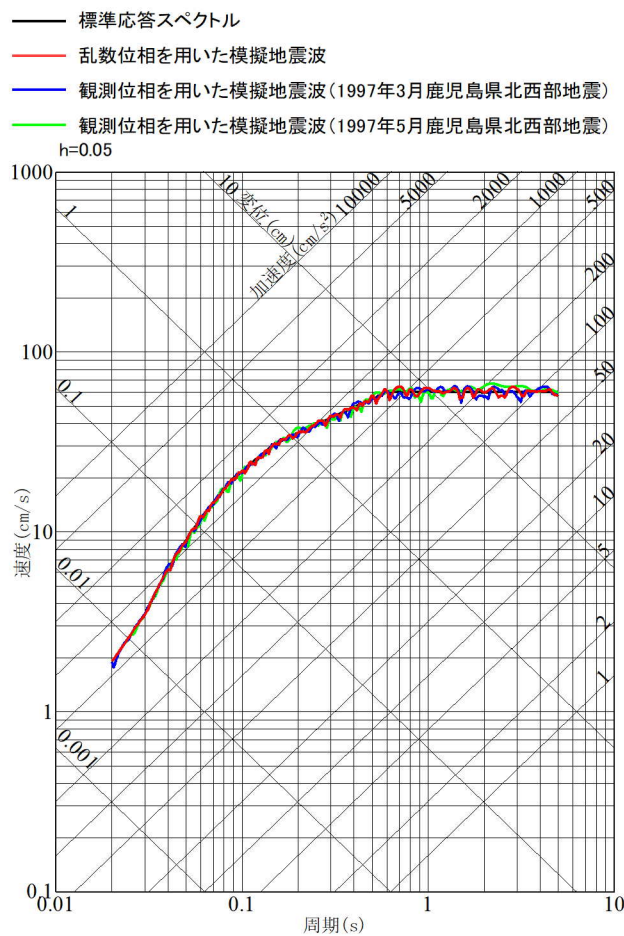


作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
①応答スペクトル比R(T)	0.88 $\geq$ 0.85	0.91 $\geq$ 0.85	0.86 $\geq$ 0.85
②SI比	1.03 $\geq$ 1.00	1.00 $\geq$ 1.00	1.01 $\geq$ 1.00

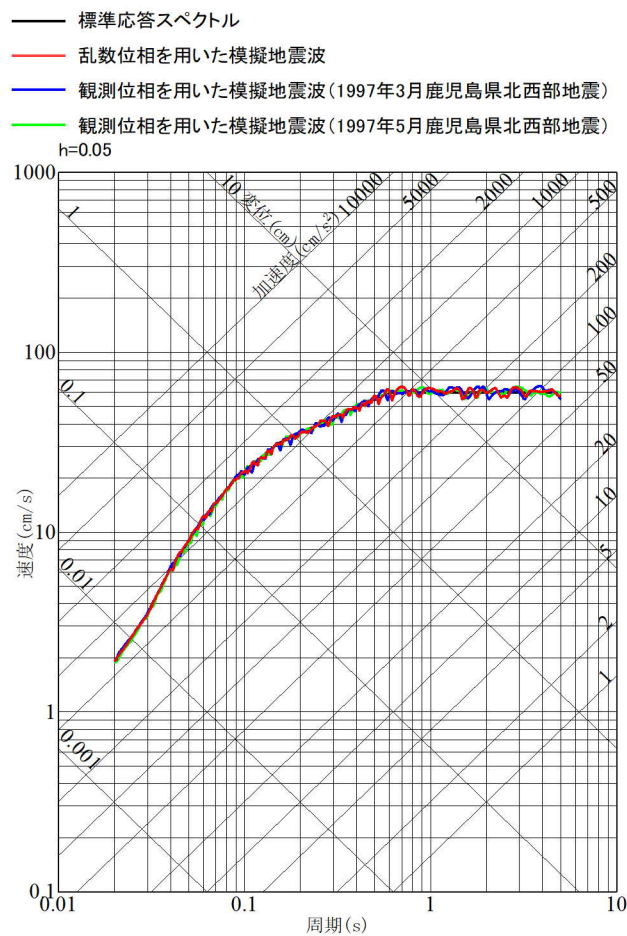
## 2.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

### ■ 地震基盤相当面における模擬地震波の応答スペクトル（乱数位相を用いた模擬地震波との比較）

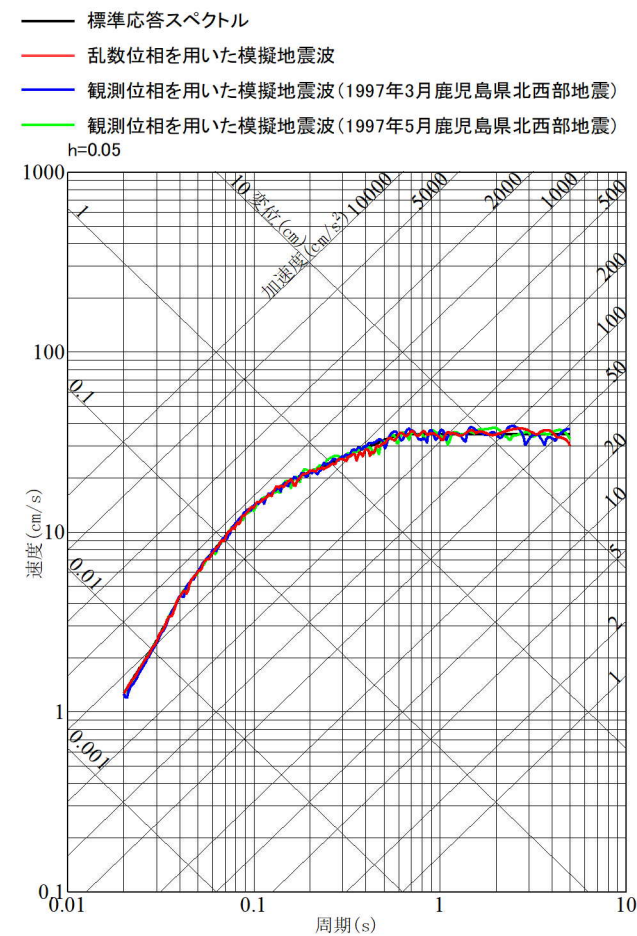
- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトルの比較を以下に示す。
- 両者の応答スペクトルは、標準応答スペクトルに適合するよう作成していることから、有意な差は見られない。



NS方向



EW方向



UD方向

地震基盤相当面における模擬地震波の応答スペクトルの比較

## 2.4 解放基盤表面の地震波の比較

### ■ 解放基盤表面の地震波の作成

- 地震基盤相当面における模擬地震波に対して、一次元波動論により、解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、標準応答スペクトルを考慮した解放基盤表面での地震動を作成する。解放基盤表面における地震動の検討は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを使用する。

### ■ 解放基盤表面の地震波の比較

- 乱數位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波について、下記のような着目点で比較を行い複数の方法による特徴の違いを確認した上で、標準応答スペクトルに基づく地震動評価に用いる模擬地震波を選定する。

比較・検討項目	着目点	概要
①時刻歴波形	<ul style="list-style-type: none"><li>最大加速度の大きさ</li><li>強震部の継続時間<sup>※</sup>の長さ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>解放基盤表面における時刻歴波形の最大加速度について比較</li><li>解放基盤表面における時刻歴波形の強震部の継続時間について比較</li></ul>
②応答スペクトル	<ul style="list-style-type: none"><li>周期ごとの応答値の大きさ</li><li>周期ごとの応答値の比の大きさ</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>解放基盤表面における応答スペクトルの比較</li><li>地震基盤相当面における応答スペクトルに対する解放基盤表面における応答スペクトルの比による増幅率の比較</li></ul>

※解放基盤表面の地震波の最大加速度(水平;660~687gal、鉛直;401~455gal)の0.5倍を目安として水平330gal以上、鉛直220gal以上の振幅の継続時間を強震部の継続時間として評価。

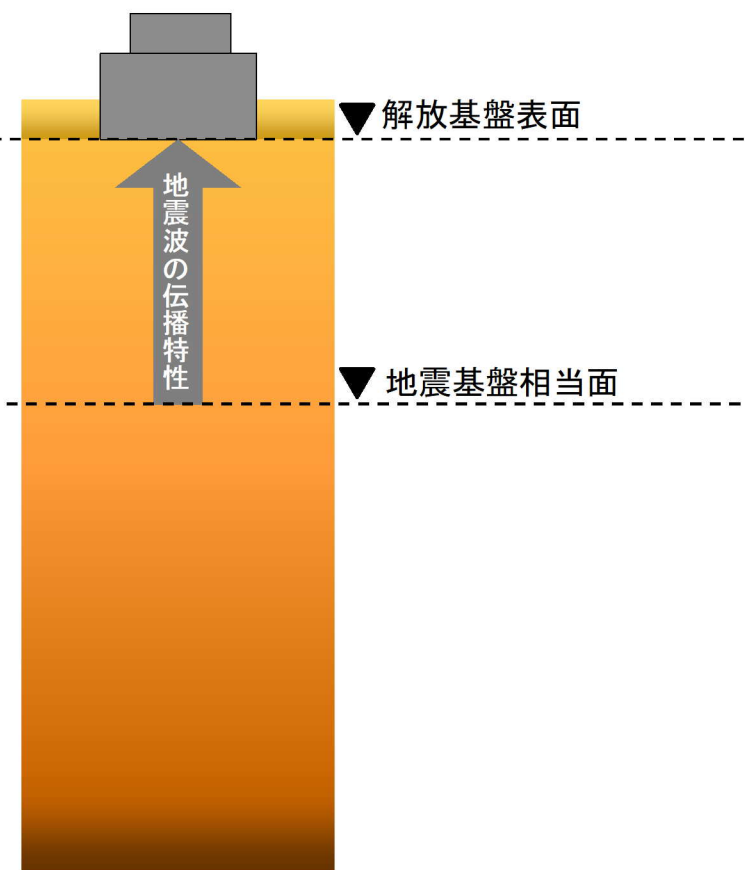
## 2.4 解放基盤表面の地震波の比較

### ■ 解放基盤表面の地震波の作成

- 地震基盤相当面の模擬地震波に対して、敷地の地盤増幅特性を考慮するため、一次元波動論により、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを使用して解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、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設定する。

地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500



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

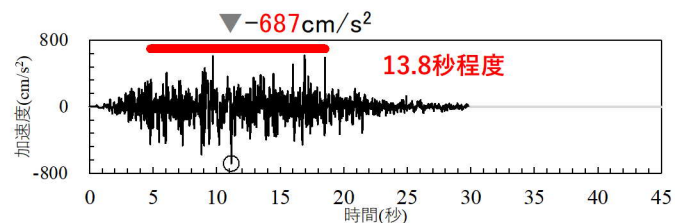


## 2.4 解放基盤表面の地震波の比較

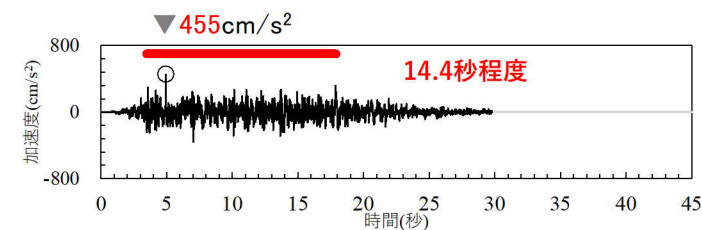
### ■ 解放基盤表面の地震波の比較：①時刻歴波形

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波を以下に示す。なお、赤線は、強震部の継続時間を示す。
- 最大加速度の大きさは、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の方が大きいことを確認。
- 強震部の継続時間についても同様に、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の方が長いことを確認。

### ● 乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波

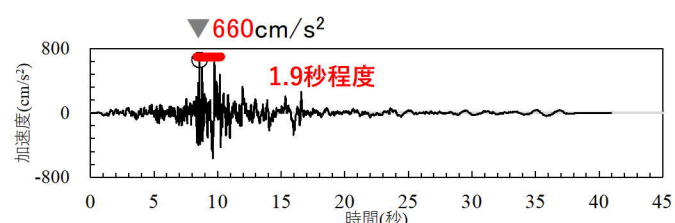


水平方向

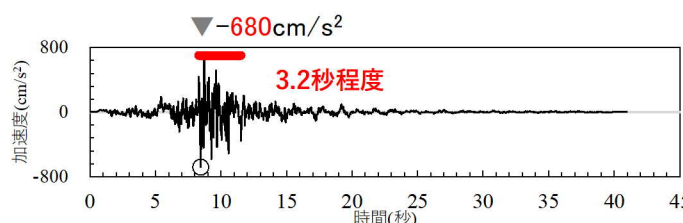


鉛直方向

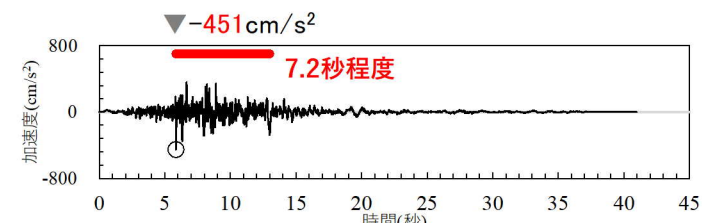
### ● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波(1997年3月鹿児島県北部地震)



NS方向

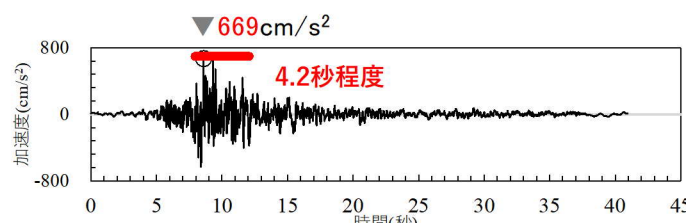


EW方向

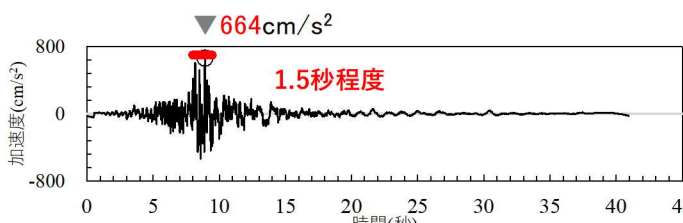


UD方向

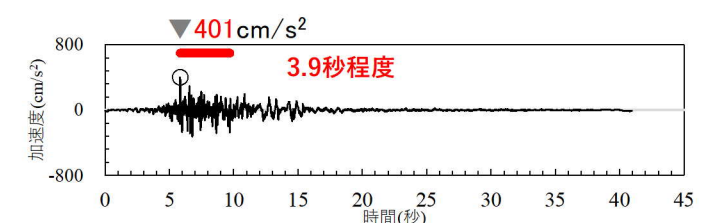
### ● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波(1997年5月鹿児島県北部地震)



NS方向



EW方向

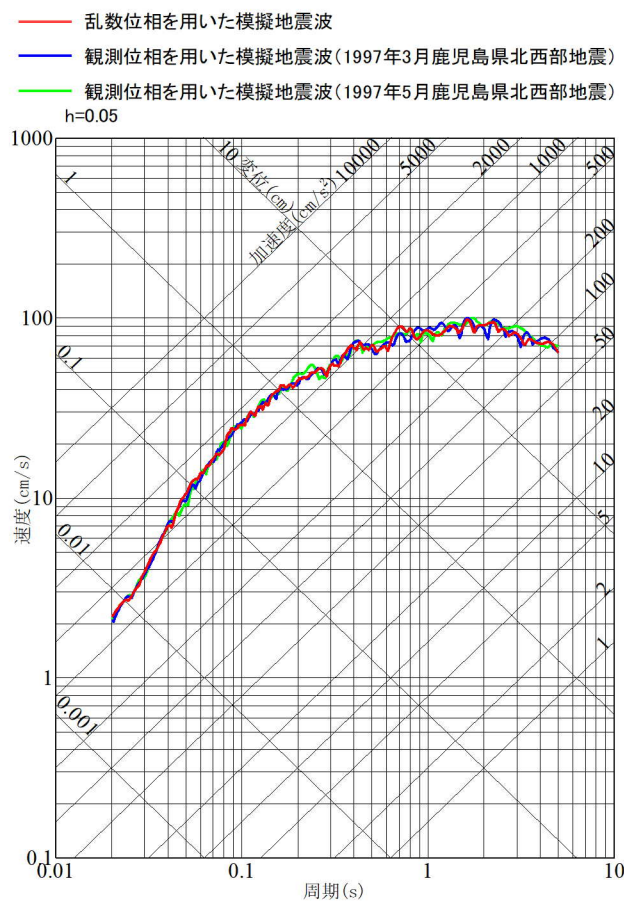


UD方向

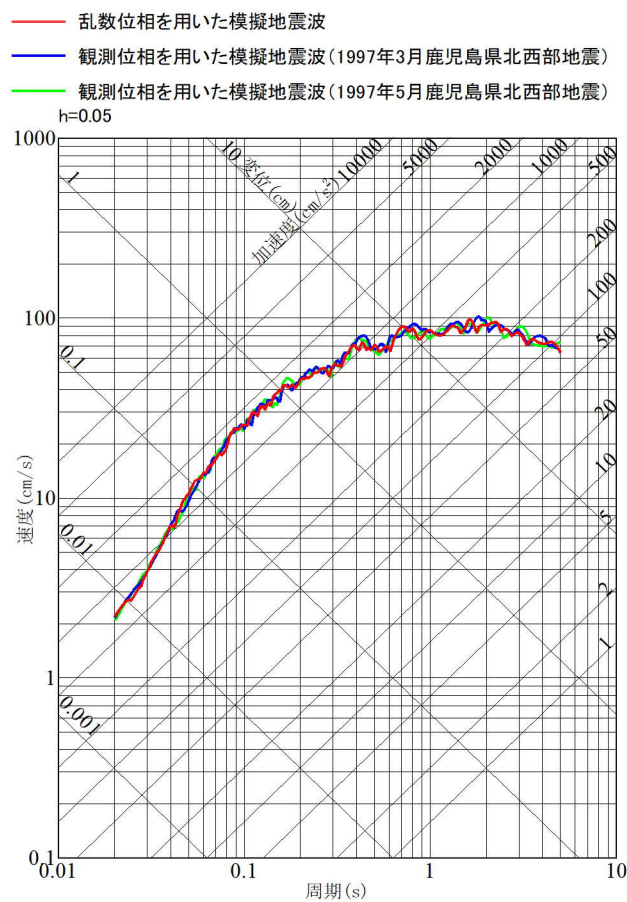
## 2.4 解放基盤表面の地震波の比較

### ■ 解放基盤表面の地震波の比較：②応答スペクトル

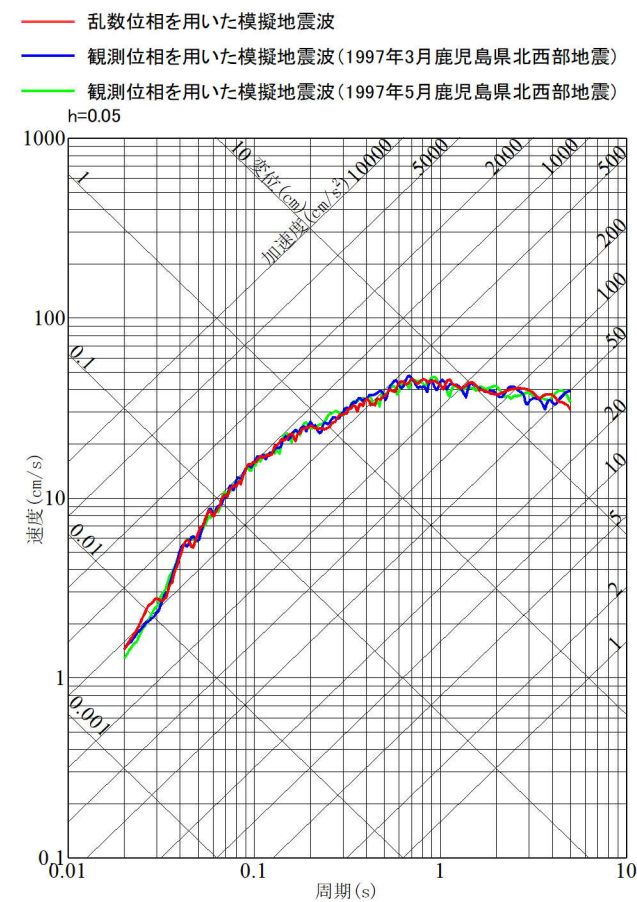
- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の応答スペクトルを以下に示す。
- 解放基盤表面での両者の応答スペクトルは同程度であり、位相の違いによる影響がないことを確認。



NS方向



EW方向



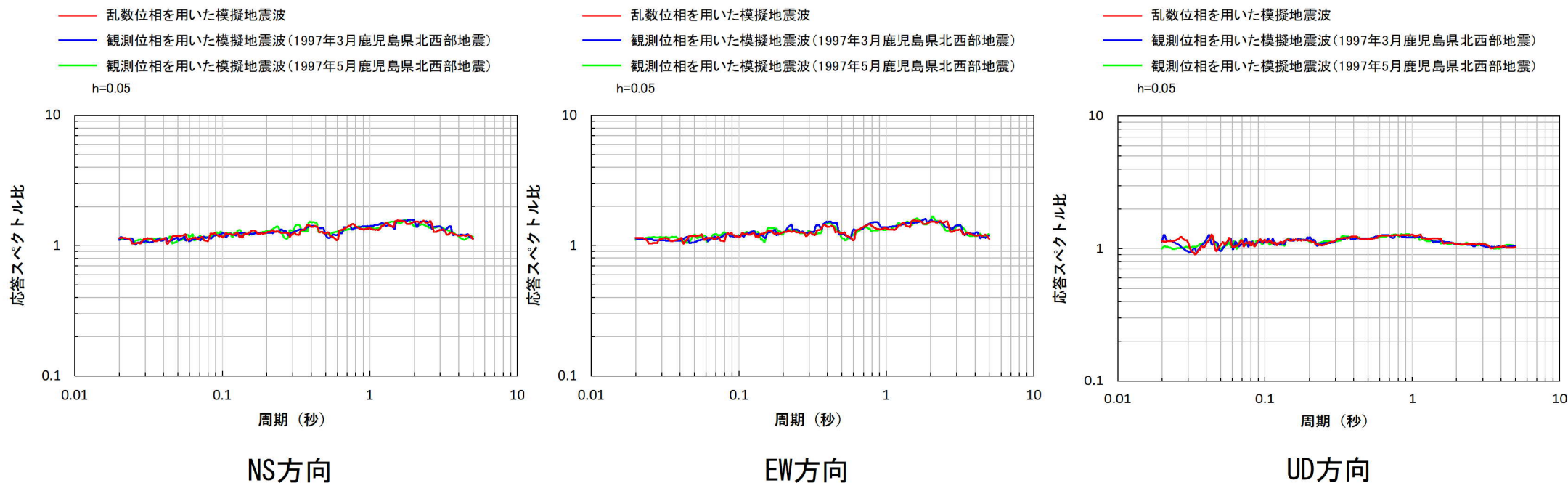
UD方向

解放基盤表面の地震波の応答スペクトル

## 2.4 解放基盤表面の地震波の比較

### ■ 解放基盤表面の地震波の比較：②応答スペクトル

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波について、地震基盤相当面における応答スペクトルに対する解放基盤表面における応答スペクトルの比を示す。
- 両者の応答スペクトル比は同程度であり、位相の違いによる影響がないことを確認。



応答スペクトルの比(解放基盤表面/地震基盤相当面)

## 2.4 解放基盤表面の地震波の比較

### ■ 解放基盤表面の地震波の比較結果

- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の比較結果を以下に示す。
- 比較の結果、時刻歴波形については、観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の方が最大加速度が大きく強震部の継続時間が長いこと、応答スペクトルについては、応答値の大きさ及び応答値の比の大きさともに、両者が同程度であることを確認した。
- 以上より、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価においては、乱数位相を用いた模擬地震波を採用する。

解放基盤表面の地震波の比較結果

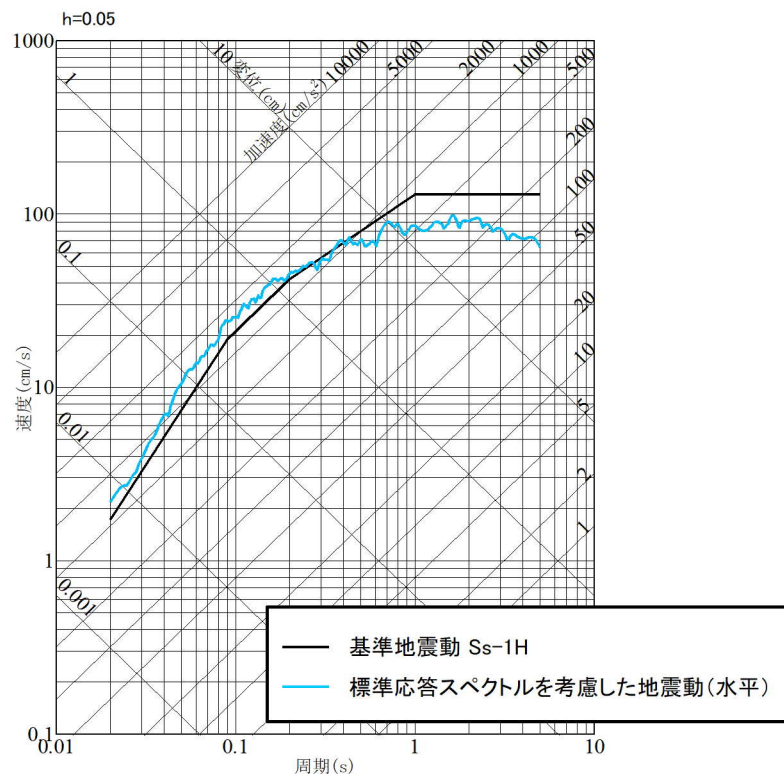
比較・検討項目	着目点	比較結果
①時刻歴波形	最大加速度の大きさ	観測位相を用いた模擬地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波の方が大きい
	強震部の継続時間の長さ	観測位相を用いた模擬地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波の方が長い
②応答スペクトル	周期ごとの応答値の大きさ	乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度
	周期ごとの応答値の比の大きさ	乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度

### 3. 基準地震動の策定

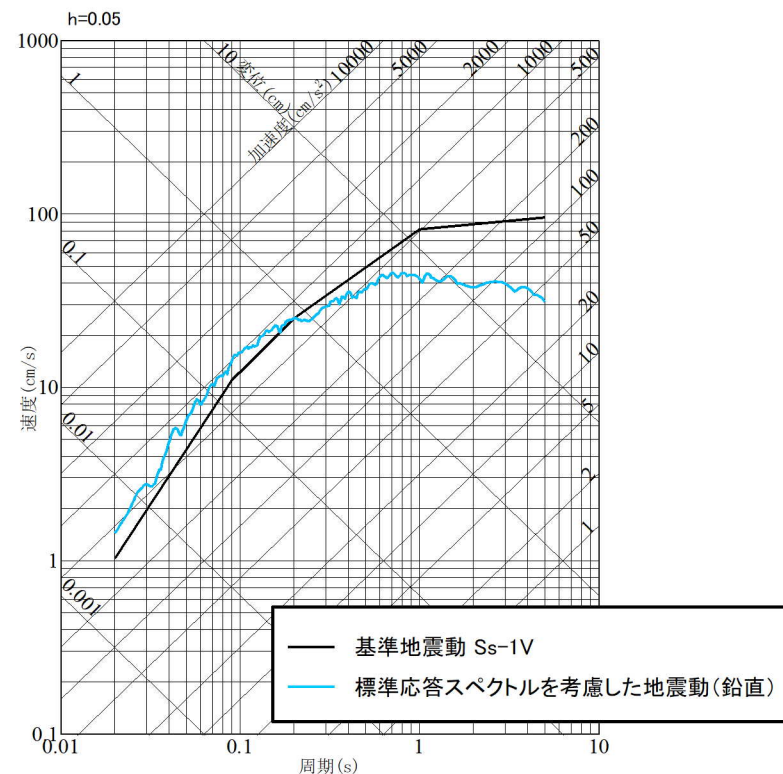
### 3. 基準地震動の策定

#### ■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動の策定

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動の策定にあたっては、標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトルがいずれかの周期帯で基準地震動Ss-1の応答スペクトルを上回る場合、新たに基準地震動として策定する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動は、一部の周期帯で基準地震動Ss-1を上回る。
- このため、標準応答スペクトルを考慮した地震動を基準地震動Ss-3として策定する。



水平方向



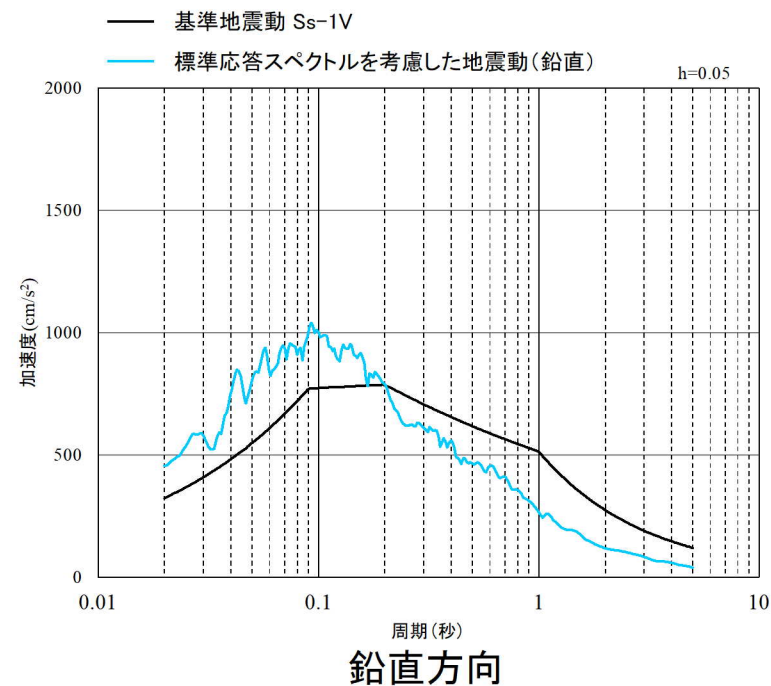
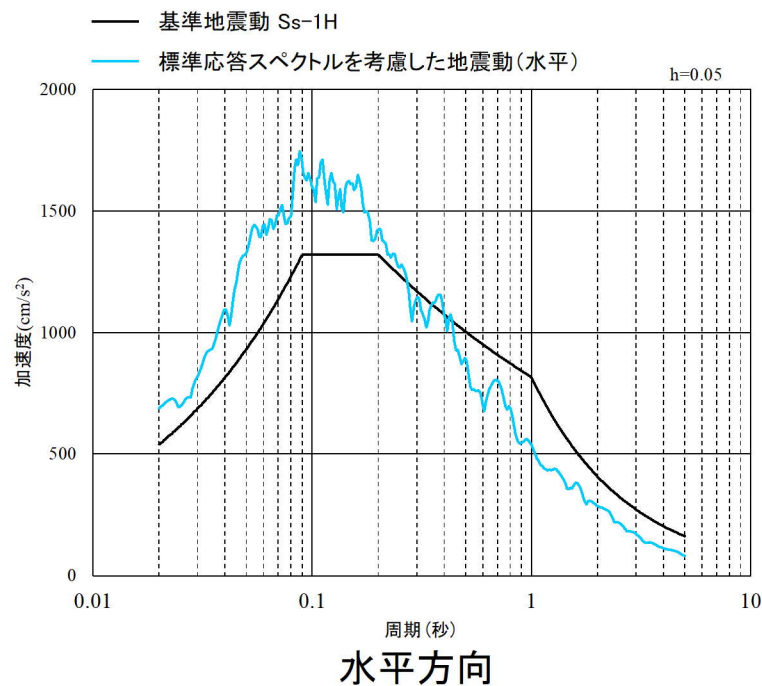
鉛直方向

標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動Ss-1との応答スペクトルの比較

### 3. 基準地震動の策定

#### ■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動による基準地震動の策定

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動の水平成分は、周期0.4秒付近より長周期側では基準地震動Ss-1を下回るが、周期0.4秒付近より短周期側の一部の周期帯（0.02~0.3秒付近、0.4秒付近）では基準地震動Ss-1を上回る。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動の鉛直成分は、周期0.2秒付近より長周期側では基準地震動Ss-1を下回るが、周期0.2秒付近より短周期側では、基準地震動Ss-1を上回る。

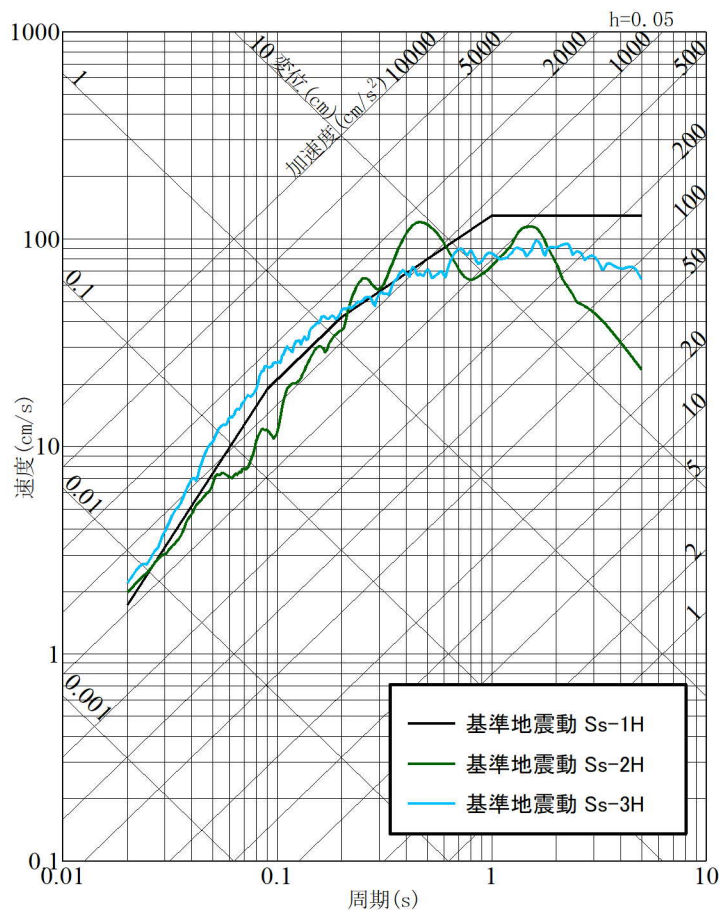


標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動Ss-1との応答スペクトルの比較

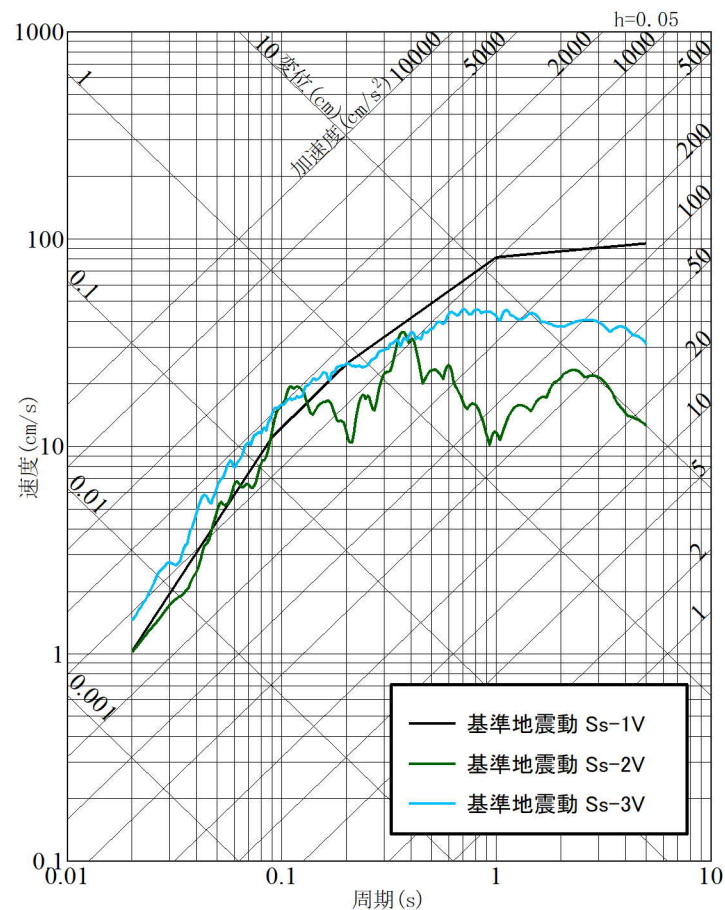
### 3. 基準地震動の策定

#### ■ 基準地震動の応答スペクトル

- 基準地震動Ss-1～Ss-3の応答スペクトルを以下に示す。



水平方向



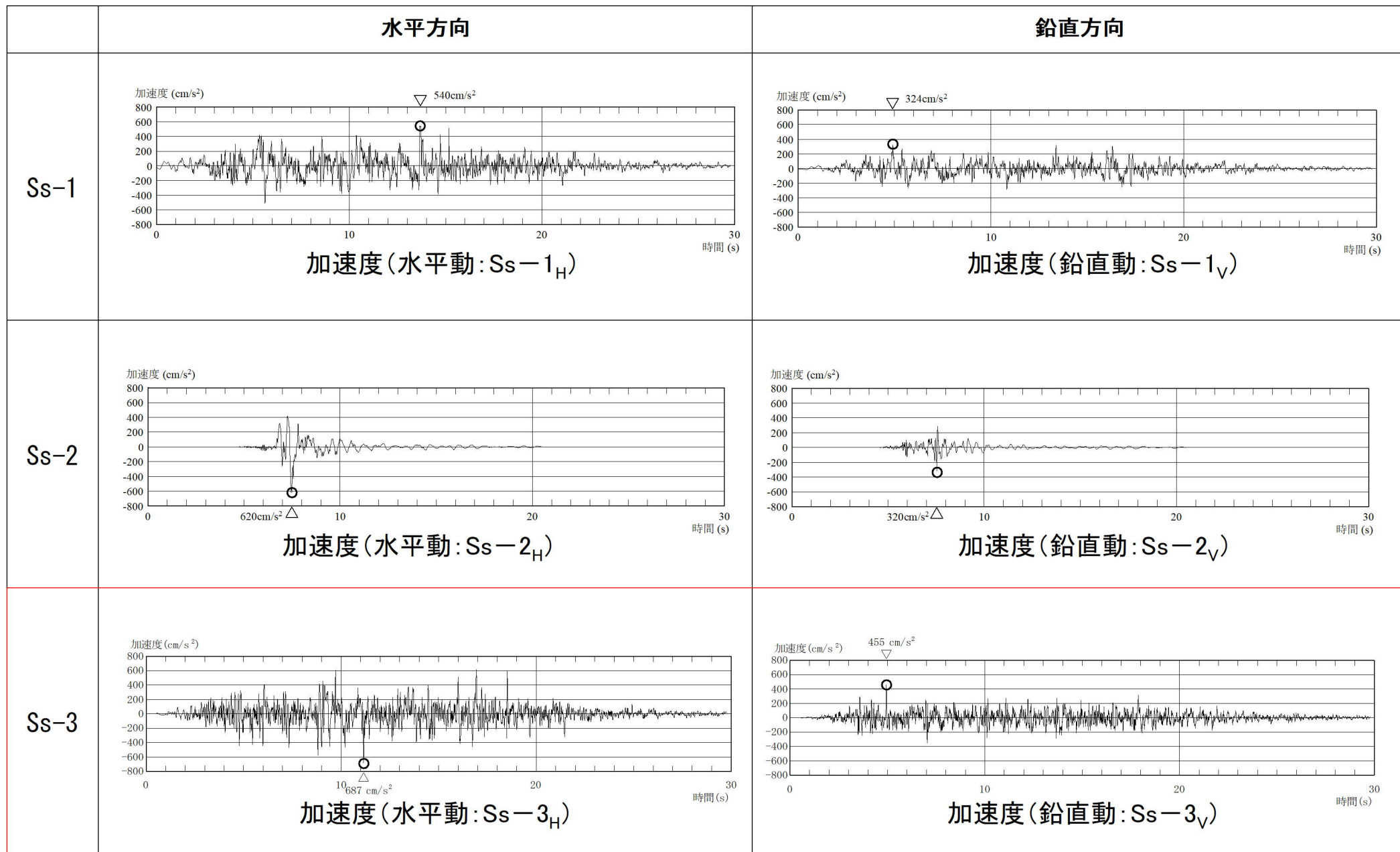
鉛直方向

基準地震動の応答スペクトル



### 3. 基準地震動の策定

#### ■ 基準地震動の加速度時刻歴波形



### 3. 基準地震動の策定

#### ■ 基準地震動の最大加速度一覧

基準地震動の最大加速度(単位:cm/s<sup>2</sup>)

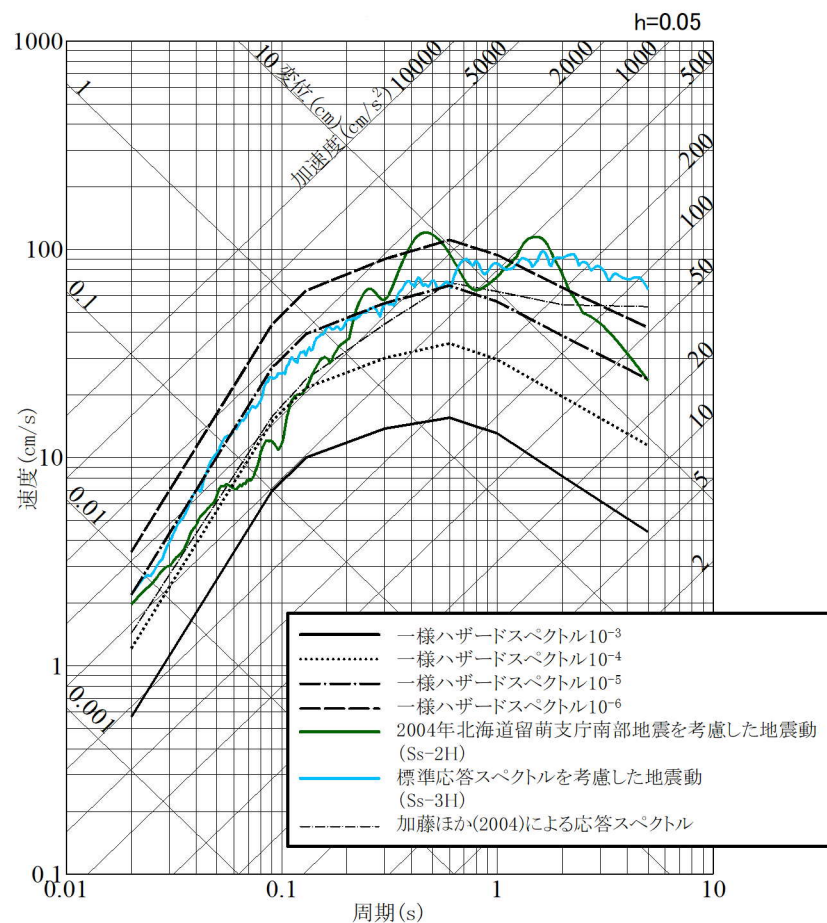
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540	324
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
全国共通に考慮すべき地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-2	620	320
	標準応答スペクトル	Ss-3	687	455

#### 4. 超過確率の参照

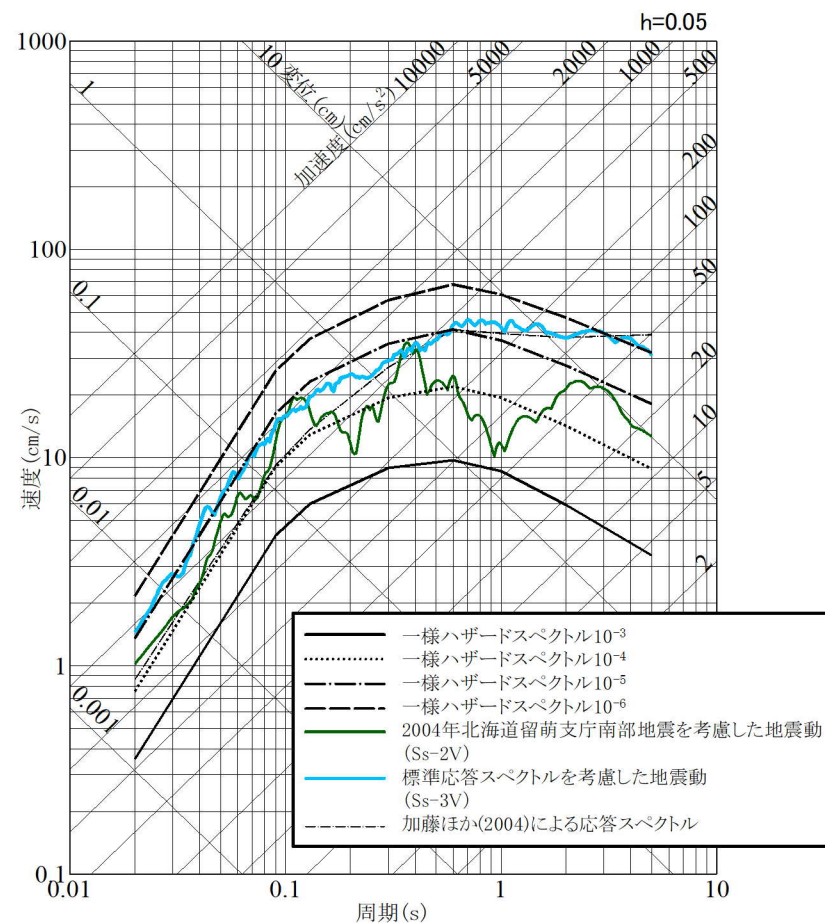
## 4. 超過確率の参照

### ■ 「震源を特定せず策定する地震動」の超過確率

- 「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較する。
- 「震源を特定せず策定する地震動」の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認。



水平方向

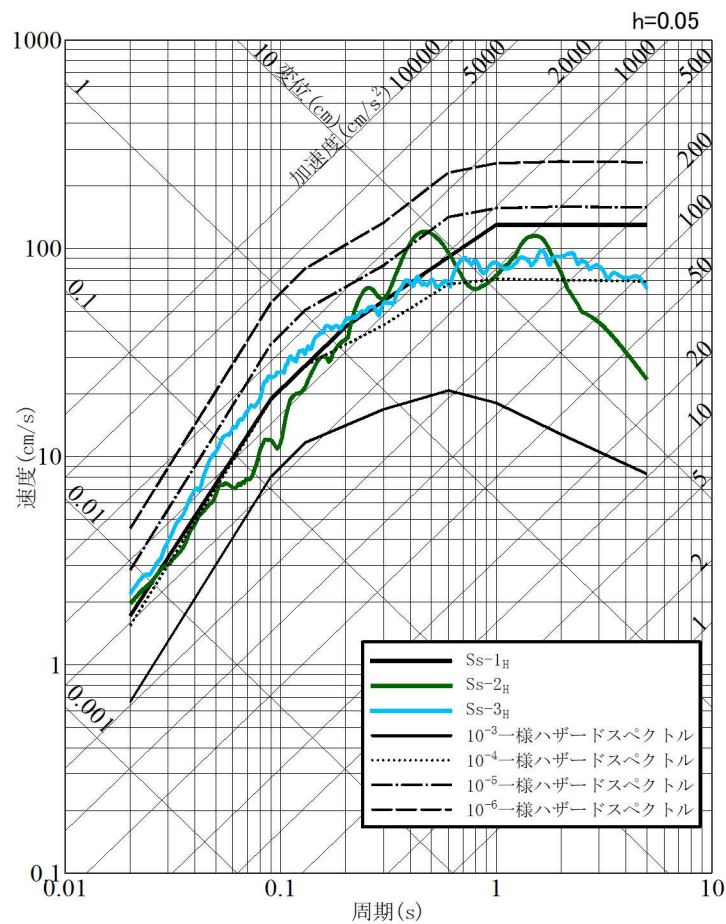


鉛直方向

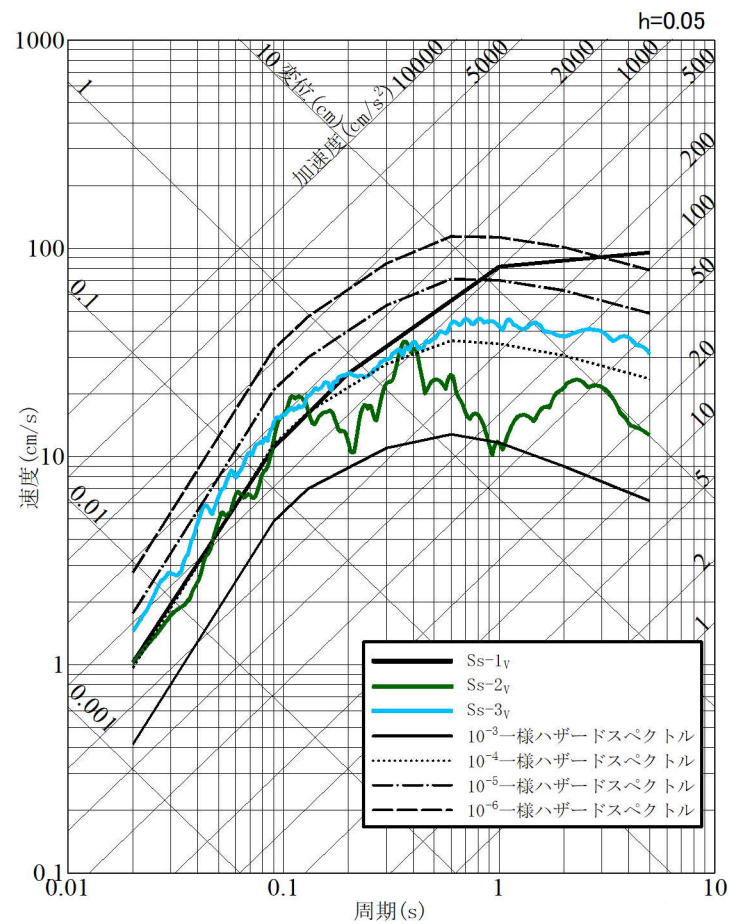
## 4. 超過確率の参照

### ■ 基準地震動の超過確率

- 基準地震動の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「特定震源モデル」及び「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較する。
- 基準地震動の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認。



水平方向



鉛直方向

## 5. まとめ

## 5. まとめ

### 【模擬地震波の作成】

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる模擬地震波は、乱数位相を用いる方法と観測位相を用いる方法の2つの方法を比較する方針とし、以下の通り確認したことから、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価においては乱数位相を用いた模擬地震波を採用した。
  - － 解放基盤表面における時刻歴波形の最大加速度について、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波の方が大きい
  - － 解放基盤表面における時刻歴波形の強震部の継続時間について、水平方向、鉛直方向ともに乱数位相を用いた模擬地震波の方が長い
  - － 解放基盤表面における応答スペクトルについて、乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度
  - － 地震基盤相当面における応答スペクトルに対する解放基盤表面における応答スペクトルの比について、乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度

### 【基準地震動の策定】

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動は、一部の周期帯で基準地震動 $S_s-1$ を上回ることから基準地震動 $S_s-3$ として策定した。

### 【超過確率の参照】

- 「震源を特定せず策定する地震動」の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較した結果、「震源を特定せず策定する地震動」の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認した。
- 基準地震動の応答スペクトルを、既許可で評価した内陸地殻内地震の「特定震源モデル」及び「領域震源モデル」による一様ハザードスペクトルと比較した結果、基準地震動の年超過確率は、 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 程度であり、既許可での評価結果と同等であることを確認した。

**【参考①】 既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認**



# 【参考①】既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

## ■ 既許可における確率論的地震ハザード評価

- ・ 既許可では、川内原子力発電所に及ぼす影響の大きい内陸地殻内地震を対象に、「特定震源モデル」と「領域震源モデル」を構築して確率論的地震ハザード評価を実施。

### 特定震源モデル

- ・ ひとつの地震に対して、震源の位置、規模及び発生頻度を特定して扱うモデル
  - － 震源の位置、規模及び発生頻度は調査及び各種文献を基に設定
  - － 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動評価の検討用地震、及び「その他の活断層」として敷地から100km程度以内の周辺の活断層（布田川・日奈久断層帯（M8.1）等）を設定

### 領域震源モデル

- ・ ある拡がりを持った領域の中で発生する地震群として取り扱うモデル
  - － 領域震源の地震活動区分は、萩原（1991）及び垣見ほか（2003）による区分を考慮
  - － 領域の地震規模と地震発生頻度は気象庁カタログに基づき設定（1926年1月～2011年12月）
  - － 最大マグニチュードは、気象庁カタログや各種文献を基に設定



- 既許可以降に発生した2016年熊本地震（M7.3）等の地震活動により、既許可の確率論的地震ハザード評価に影響がないことを確認するため、最新の気象庁カタログ（1926年1月～2022年3月）に更新し、特定震源モデル及び領域震源モデルのそれぞれについて確認を実施。
- その結果、既許可の特定震源モデル及び領域震源モデルへの影響がないことを確認（41～43頁）。
- したがって、既許可の確率論的地震ハザード評価への影響もないことから、年超過確率の参照においては既許可で評価した一様ハザードスペクトルを使用。

# 【参考①】既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

## ■ 特定震源モデル及び領域震源モデルへの影響確認

### 特定震源モデル

- 既許可以降に川内原子力発電所周辺で発生した地震のうち、活断層との関係が明らかな地震は、布田川・日奈久断層帯の活動とされる2016年熊本地震のみ。2016年熊本地震を踏まえても、布田川・日奈久断層帯（M8.1）の震源の位置、規模、発生頻度に影響はない。
  - 2016年熊本地震（M7.3）は布田川・日奈久断層帯（M8.1）で発生しており、震源の位置や規模が変わるものではない。
  - 2016年熊本地震（M7.3）により、布田川・日奈久断層帯（M8.1）の発生頻度の基となる活動度（B級；平均変位速度 $2.5 \times 10^{-4}$ m/年）が変わる知見はなく、M8.1の発生頻度に影響はない。
- 以上より、特定震源モデルへの影響はない。

### 領域震源モデル

- 最新の気象庁カタログを踏まえ、萩原（1991）（図1）及び垣見ほか（2003）（図2）における領域の最大規模及び年発生頻度を更新。
  - 評価対象としている萩原（1991）の領域O及び垣見ほか（2003）の領域11X1で、2015年薩摩半島西方沖の地震（M7.1）が発生。既許可では、上記領域の最大MはM6.6と設定していたことから、M7.1に更新。なお、2016年熊本地震本震（M7.3）は、既許可では、特定震源モデルで布田川・日奈久断層帯（M8.1）として評価していることから、重複した評価を避けるため、領域震源モデルでは考慮しない。
  - 最新の気象庁カタログ（1926年1月～2022年3月）に基づき、各領域の年発生頻度を更新。
- 既許可と気象庁カタログ更新後のハザード曲線の比較により、領域震源モデルへの影響がないことを確認（42～43頁）。

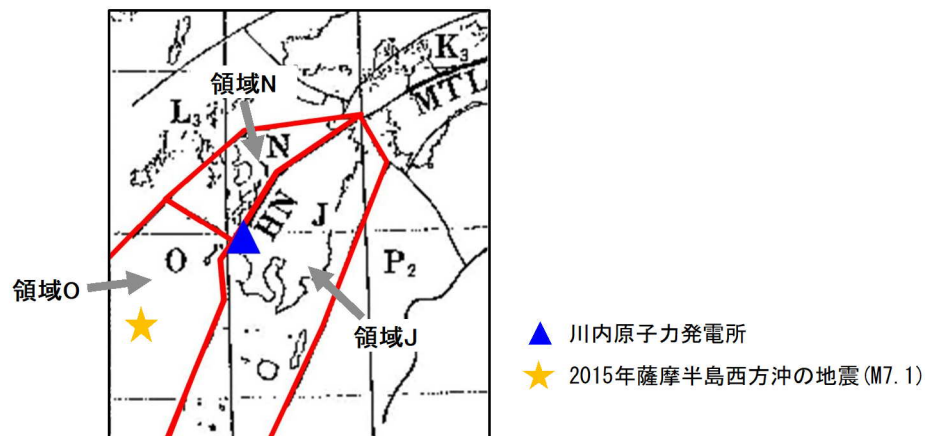


図1 萩原(1991)の地震地体構造区分（九州地方を拡大）

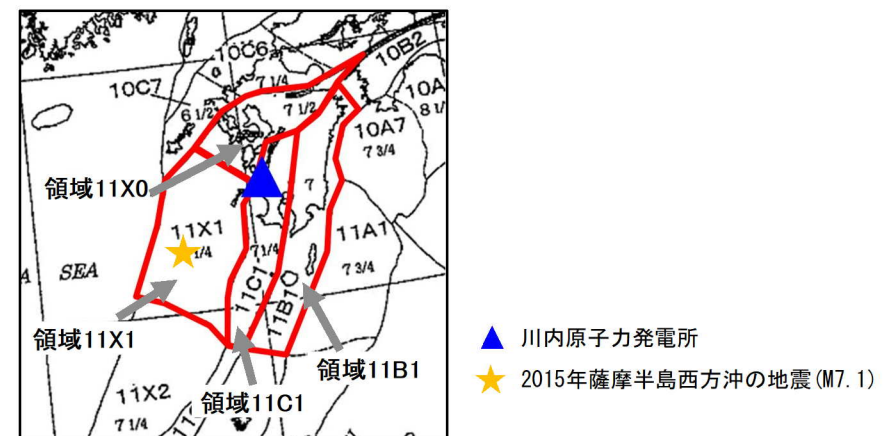


図2 垣見ほか(2003)の地震地体構造区分（九州地方を拡大）

# 【参考①】既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

- 気象庁カタログ更新後の萩原（1991）による領域震源の諸元及びハザード曲線を示す。
  - 気象庁カタログ更新後、領域N及び領域Oは年発生頻度がやや増加しハザード曲線が大きくなるが、領域震源全体のハザード曲線に対する寄与は小さいため、領域震源全体のハザード曲線は既許可と同等（更新前後でハザード曲線が概ね重なっている）であり、領域震源モデルへの影響はない。

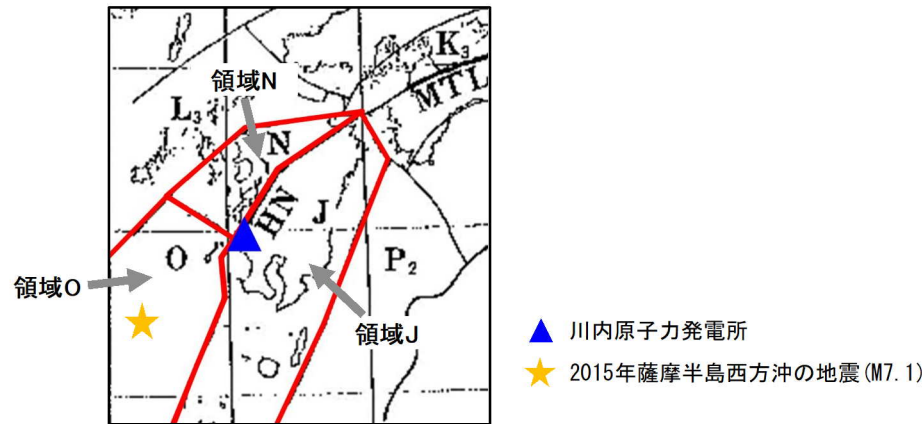


図3 萩原(1991)の地震地体構造区分(九州地方を拡大)

表1 萩原(1991)による領域震源の諸元の比較

領域	期間	最小M	最大M	b 値※1	年発生頻度※2
J	1926.1~ 2022.3 (1926.1~ 2011.12)	5.0 (5.0)	7.1/6.8/6.6 (7.1/6.8/6.6)	1.00 (1.00)	0.84 (0.88)
N		5.0 (5.0)	6.9 (6.9)	0.99 (1.10)	0.36 (0.33)
O		5.0 (5.0)	7.1 (6.6)	0.85 (0.97)	0.33 (0.28)

( )内は、既許可の評価結果を示す

※1 対象期間に領域で発生した地震群のMと地震の数との関係(G-R則)を示す。Mが大きな地震の数が増加するとb値が小さくなる。

※2 領域における1年あたりの地震(M5)の数を示す。地震活動が活発になると年発生頻度が大きくなる。

(例) 領域N及び領域Oは、気象庁カタログ更新後、Mが大きな地震の数が増加していることから、b値は小さくなり、年発生頻度は大きくなる。このため、年超過確率は大きくなる傾向にある(領域Oは最大M見直しにより、年超過確率がより増大)。

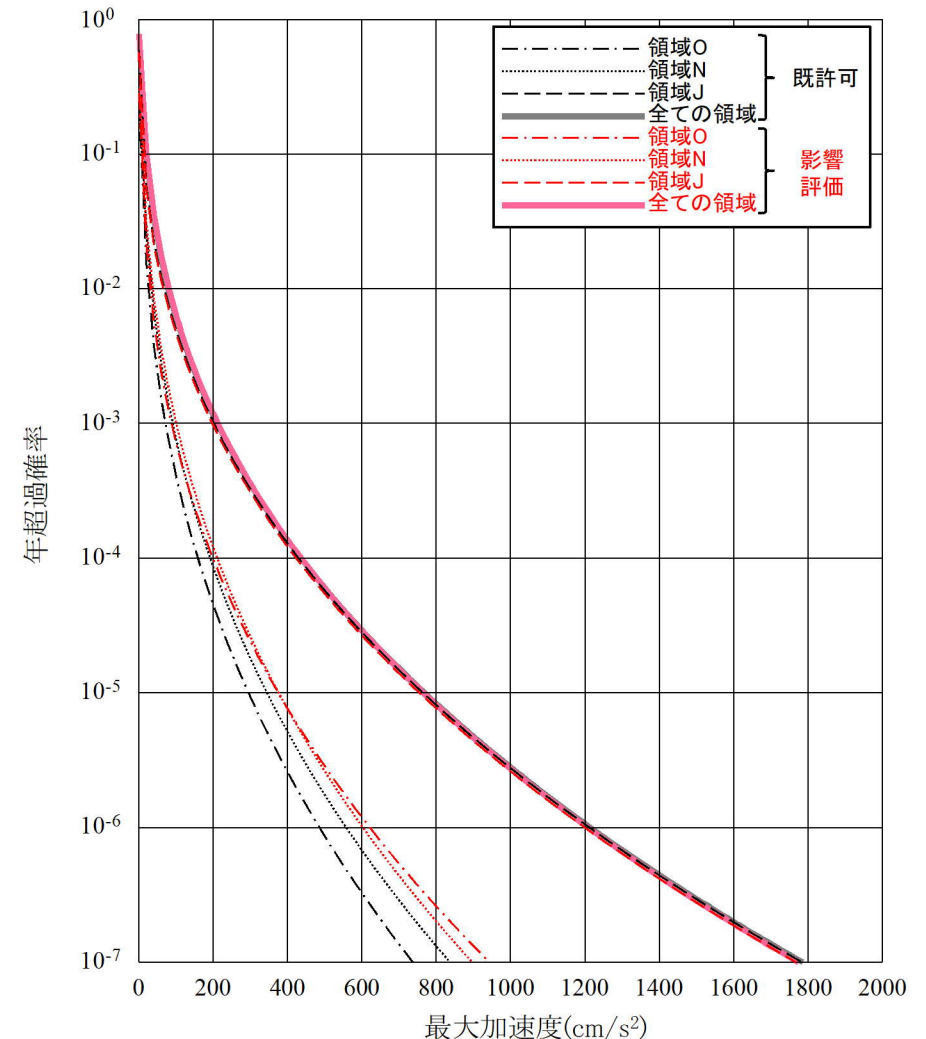


図4 領域ごとのハザード曲線の比較  
(萩原(1991))

# 【参考①】既許可以降の地震活動による確率論的地震ハザード評価への影響確認

- 気象庁カタログ更新後の垣見ほか（2003）による領域震源の諸元及びハザード曲線を示す。
  - 気象庁カタログ更新後、領域11X0及び領域11X1は年発生頻度がやや増加しハザード曲線が大きくなるが、領域震源全体のハザード曲線に対する寄与は小さいため、領域震源全体のハザード曲線は既許可と同等（更新前後でハザード曲線が概ね重なっている）であり、領域震源モデルへの影響はない。

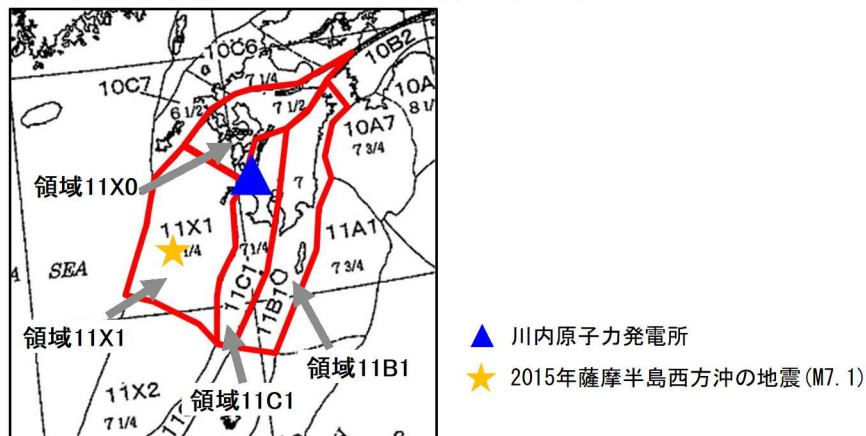


図5 垣見ほか(2003)の地震地体構造区分(九州地方を拡大)

表2 垣見ほか(2003)による領域震源の諸元の比較

領域	期間	最小M	最大M	b値※1	年発生頻度※2
11B1	1926.1~ 2022.3 (1926.1~ 2011.12)	5.0 (5.0)	6.8 (6.8)	0.97 (0.97)	0.34 (0.37)
11C1		5.0 (5.0)	7.1/6.8/6.6 (7.1/6.8/6.6)	0.93 (0.90)	0.22 (0.24)
11X0		5.0 (5.0)	6.9 (6.9)	1.02 (1.14)	0.36 (0.33)
11X1		5.0 (5.0)	7.1 (6.6)	0.89 (1.01)	0.37 (0.33)

( )内は、既許可の評価結果を示す

※1 対象期間に領域で発生した地震群のMと地震の数との関係(G-R則)を示す。

Mが大きな地震の数が増加するとb値が小さくなる。

※2 領域における1年あたりの地震(M5)の数を示す。地震活動が活発になると年発生頻度が大きくなる。

(例) 領域11X0及び領域11X1は、気象庁カタログ更新後、Mが大きな地震の数が増加していることから、b値は小さくなり、年発生頻度は大きくなる。このため、年超過確率は大きくなる傾向にある（領域11X1は最大M見直しにより、年超過確率がより増大）。

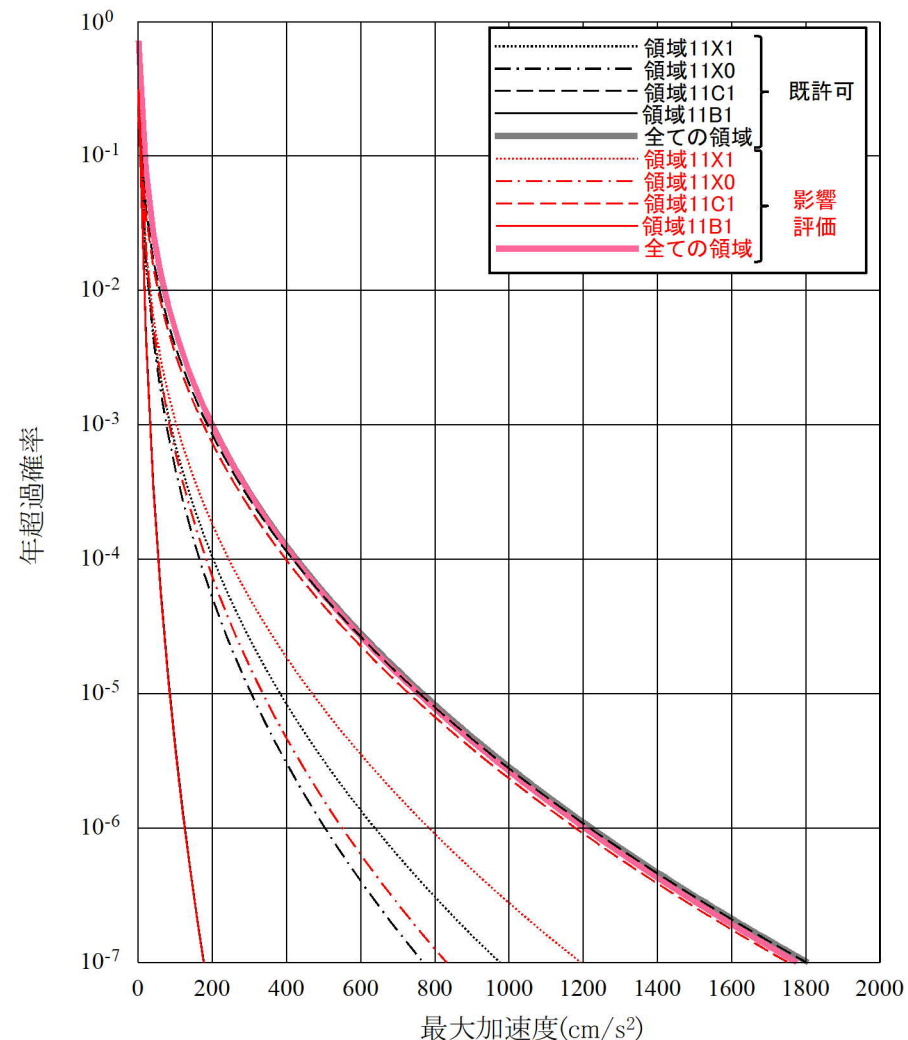


図6 領域ごとのハザード曲線の比較  
(垣見ほか(2003))

## 参考文献

- 1) 日本電気協会(2015):原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015,一般社団法人日本電気協会
- 2) S. Noda, 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, Oct. 16-18, 399-408.
- 3) 武村雅之(1990):日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係,地震 第2輯,第43巻.
- 4) H. Kanamori(1977): The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.82, No.20, 2981-2987.
- 5) 萩原尊禮編 (1991) : 日本列島の地震 地震工学と地震地体構造、鹿島出版会.
- 6) 垣見俊弘・松田時彦・相田勇・衣笠善博(2003) : 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分、地震、第2輯、第55巻、第4号、pp. 389-406.