

伊方発電所

震源を特定せず策定する地震動

— 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価 —

2021年9月10日

四国電力株式会社

目次

1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要	2
2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定	4
3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成	9
3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱數位相を用いた）模擬地震波の作成	12
3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成	16
3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成	21
3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析	26
3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定	35
4. まとめ	38

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱数位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要

震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要

- 2021年4月21日、設置許可基準規則の解釈※1及び審査ガイド※2が改正され、「震源を特定せず策定する地震動」に係る記載内容が改正された。
- このため、伊方発電所3号機の基準地震動評価のうち、震源を特定せず策定する地震動評価について、改正後の設置許可基準規則第4条に適合していることを、設置許可基準規則の解釈に準拠し確認した。



※1 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
※2 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド

設置許可基準規則の解釈（別記2） 関連改正箇所

第4条5項の三

上記の「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定すること。なお、上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により策定すること。

②上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。

・2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動 平成27年7月15日付け設置変更許可にて確認済

・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 本資料において確認

③上記の「地域性を考慮する地震動」の検討の結果、この地震動を策定する場合にあっては、事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震について、震源近傍における観測記録を用いること。

平成27年7月15日付け設置変更許可にて確認済

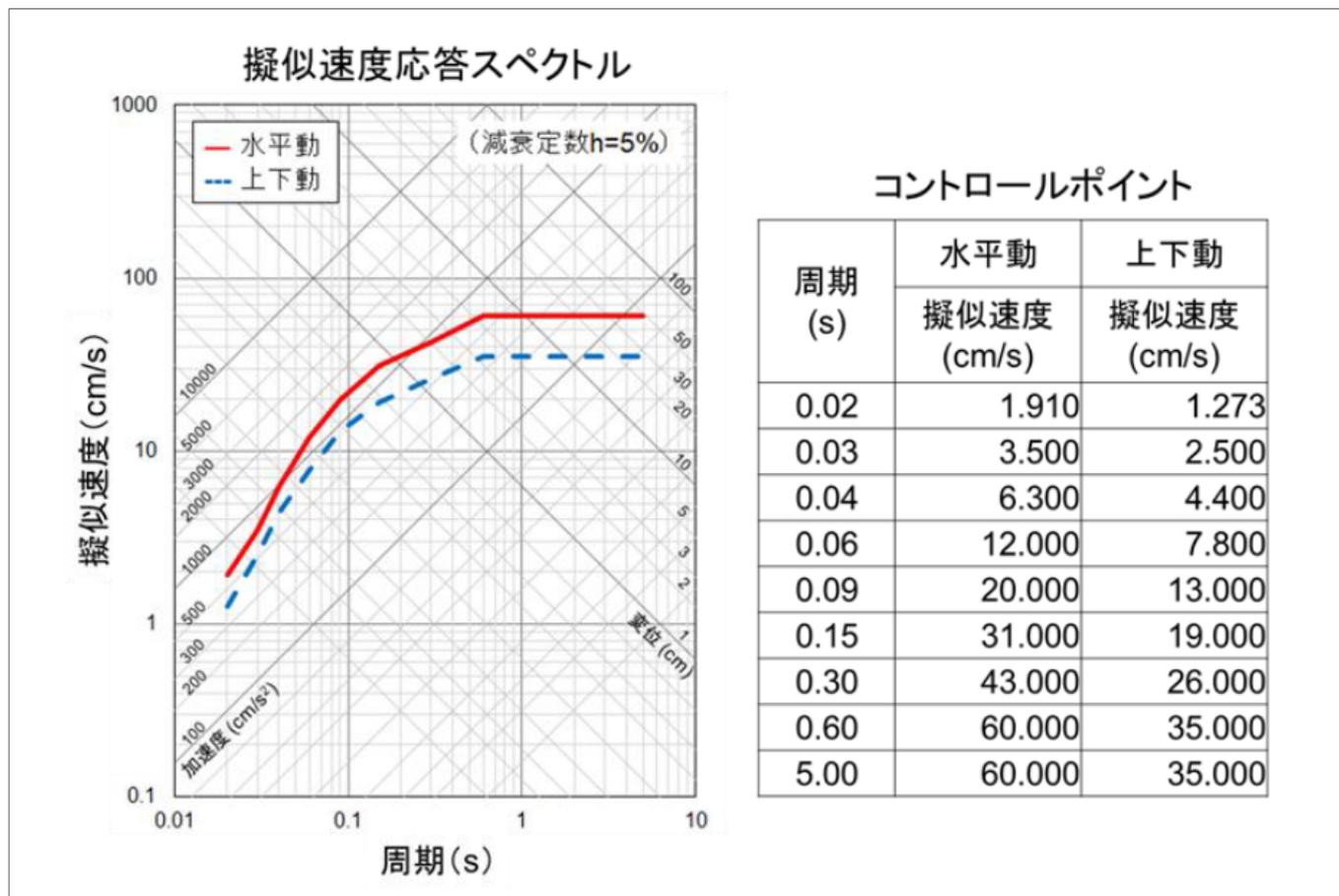
④解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的変化等の特性を適切に考慮すること。 本資料において確認

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱数位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定

震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトル

- 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」と定義されている。

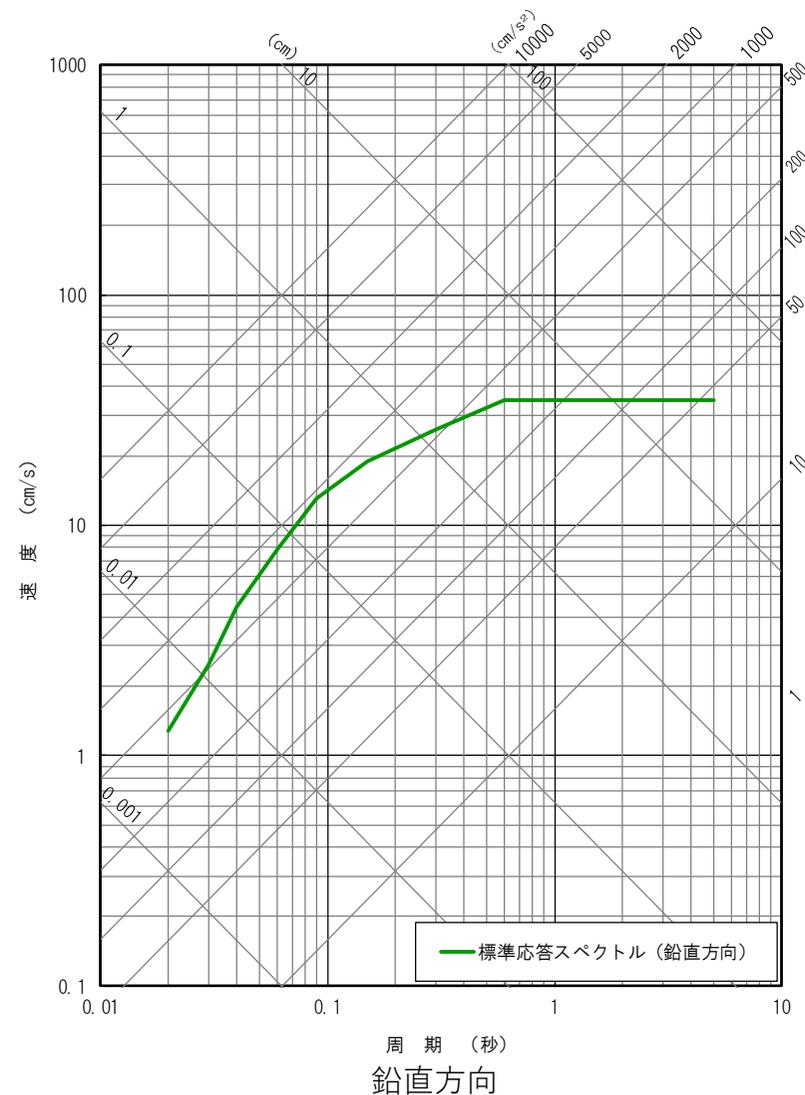
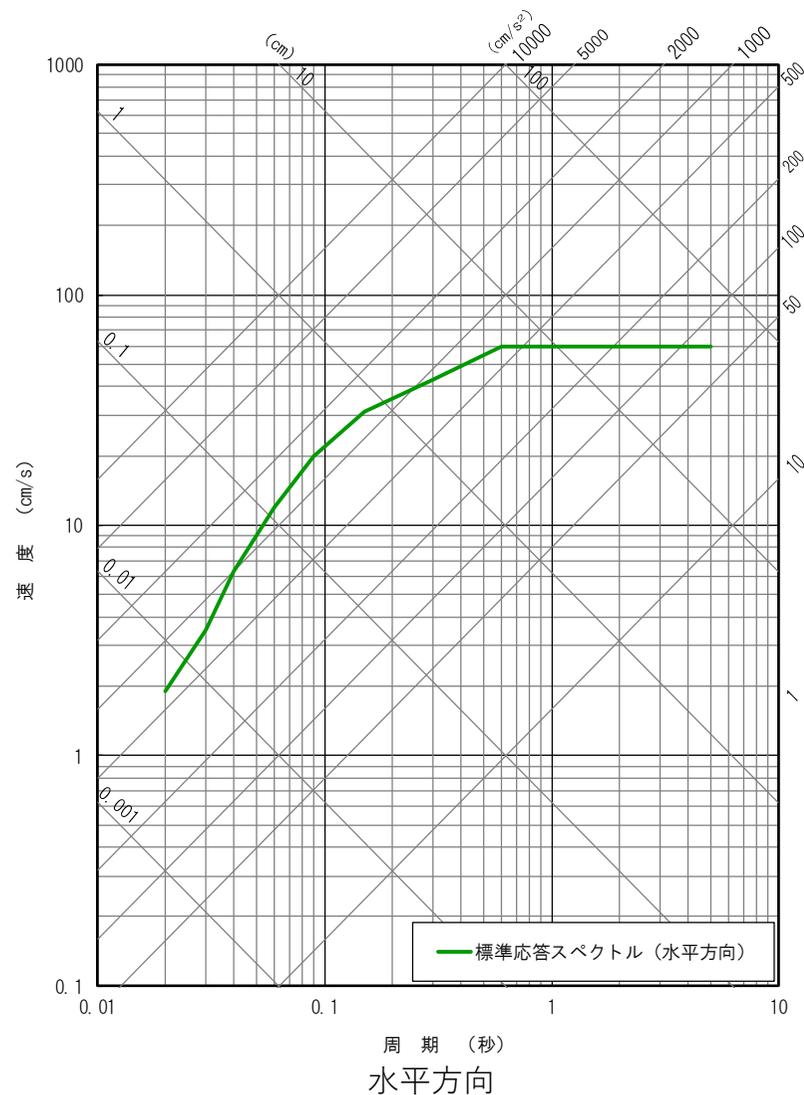


2021年4月21日原子力規制委員会資料より抜粋

2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定

震源を特定せず策定する地震動の応答スペクトル

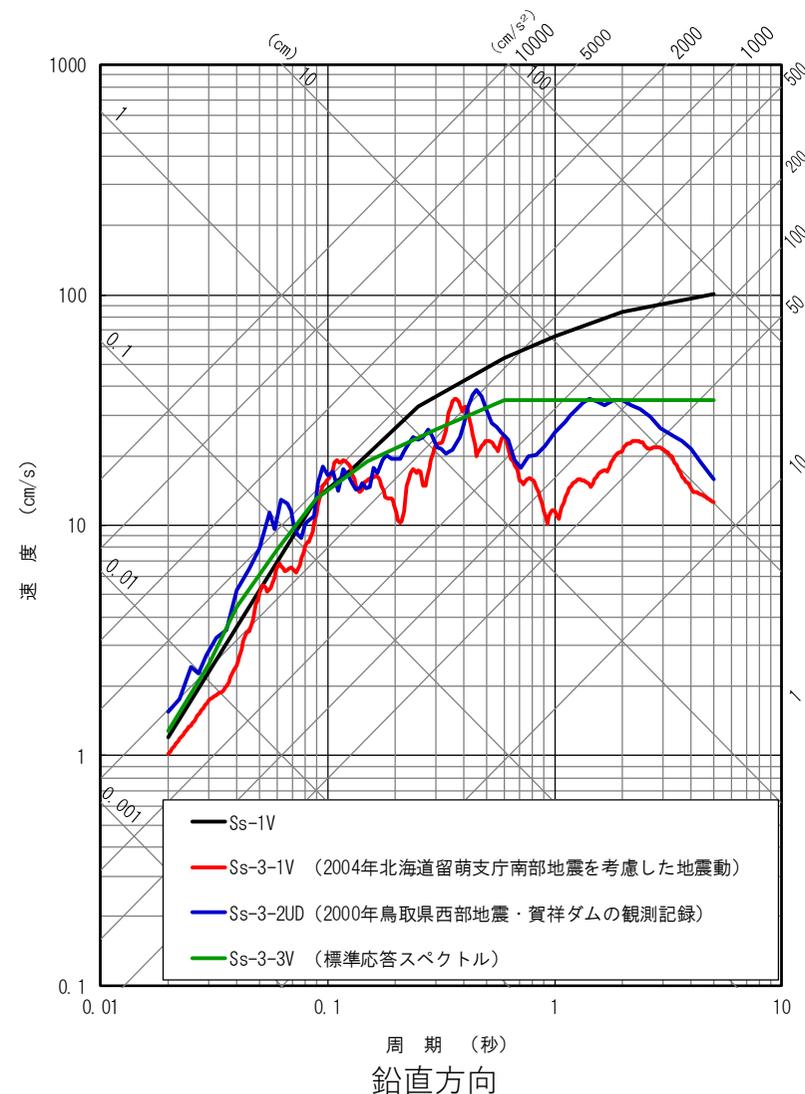
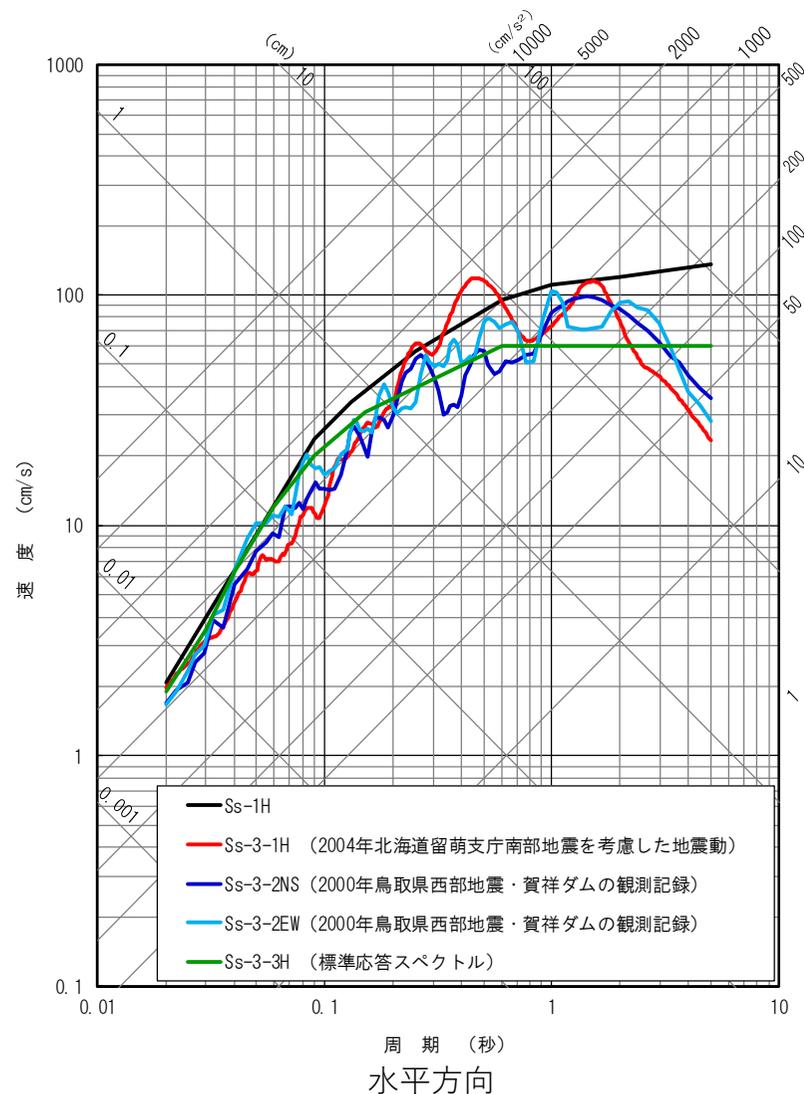
- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層) で定義されている。
- 伊方発電所においては、敷地の解放基盤表面のせん断波速度が $V_s=2600\text{m/s}$ であり地震基盤面に相当することを踏まえ、標準応答スペクトルをそのまま震源を特定せず策定する地震動の設計用応答スペクトルとして考慮する。



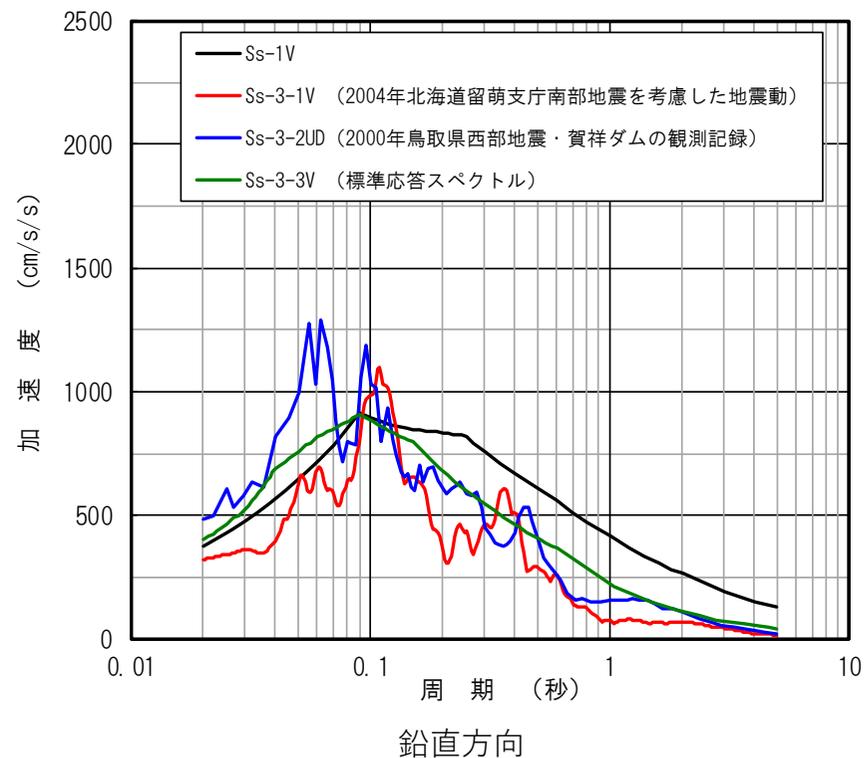
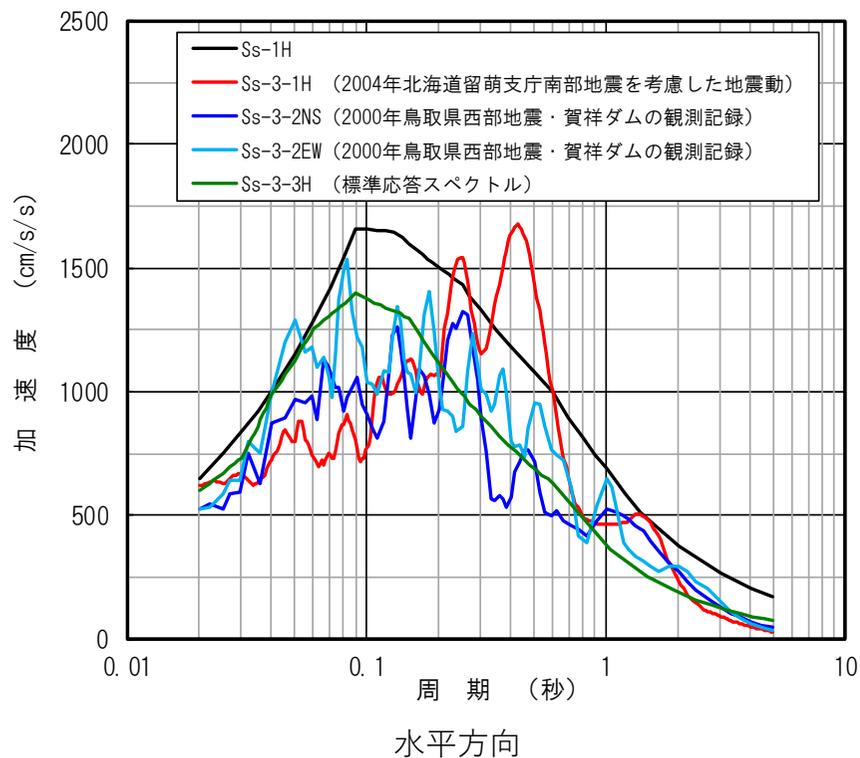
2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定

基準地震動Ss-3-3の設定

- 標準応答スペクトルについて、伊方発電所における既存の基準地震動と比較すると、水平方向は全周期帯で基準地震動Ss-1に包絡され、鉛直方向は0.1秒程度以上の周期帯で基準地震動Ss-1に包絡されるものの、鉛直方向の0.1秒程度以下の短周期側で既存の基準地震動を超過するため、**基準地震動Ss-3-3として設定する。**



基準地震動Ss-3-3の設定



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱数位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成

模擬地震波作成にあたっての考え方

○模擬地震波作成にあたっては、設置許可基準規則の解釈への適合性を確認するため、**審査ガイドの記載を踏まえた検討**を行うとともに、**検討チーム※1会合における模擬地震波の作成方法に係る議論も参考にして検討**を行う。

設置許可基準規則の解釈（別記2）第4条5項の三

④解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、**設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的变化等の特性を適切に考慮すること。**

審査ガイドの記載	観点（考え方）	説明頁
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経時的变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。	乱數位相を用いた模擬地震波に加え、 観測位相 を用いた模擬地震波について検討する	12～25頁
	作成した模擬地震波の 継続時間、経時的变化等を比較する	26～34頁

<参考> 検討チーム報告書※2「2.7 時刻歴波形の作成方法」の【検討チーム会合における議論】（27ページ）を全て記載

No.	【検討チーム会合における議論】	観点（考え方）	説明頁
1	加速度時刻歴波形を作成する際には、最大加速度よりも、 応答スペクトルにフィッティングさせることが大切 である。	JEAG4601-2015※3に示される 応答スペクトルへの適合度 を満たす模擬地震波を作成する	14～15頁 24～25頁
2	震源を特定せず策定する地震動は、新規基準において観測記録を基に策定されている旨の記載がなされていることから、 加速度時刻歴波形の位相はできるだけ観測記録に近いものを使うことが重要 と考えられる。	震源を特定せず策定する地震動（Mw6.5程度未満の内陸地殻内地震）として適切な 伊方発電所での地震観測記録の有無を整理 する	16～20頁
3	サイトで観測された記録を重視するという考えは良い。ただし、実観測記録を用いて加速度時刻歴波形を作成する際には、 小さなマグニチュードの地震から得られた位相特性がそのまま使えるか等の整理 が必要。		
4	ある地点の一つの波の位相を用いると、その記録のサイト特性が際立つため、標準応答スペクトル策定の考え方との整合性がなくなる ように留意する必要がある。	Mw6.5程度未満の内陸地殻内地震の 特徴を踏まえた位相 を用いる	21～25頁
5	断層の近傍では指向性パルスが生じる可能性があり、今後、 Mw6.5程度の地震でパルス波が発生する可能性も考慮 しておくことが望ましい。	指向性パルスが生じる可能性を考慮し、 破壊の伝播方向で生じる地震動の位相特性 を考慮する	
6	弾塑性の時刻歴応答解析 においては位相の与え方にも留意する必要がある。	1質点系弾塑性モデルを用い、 作成した模擬地震波の位相特性による応答値の違いを比較 する	33～34頁

※1 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム

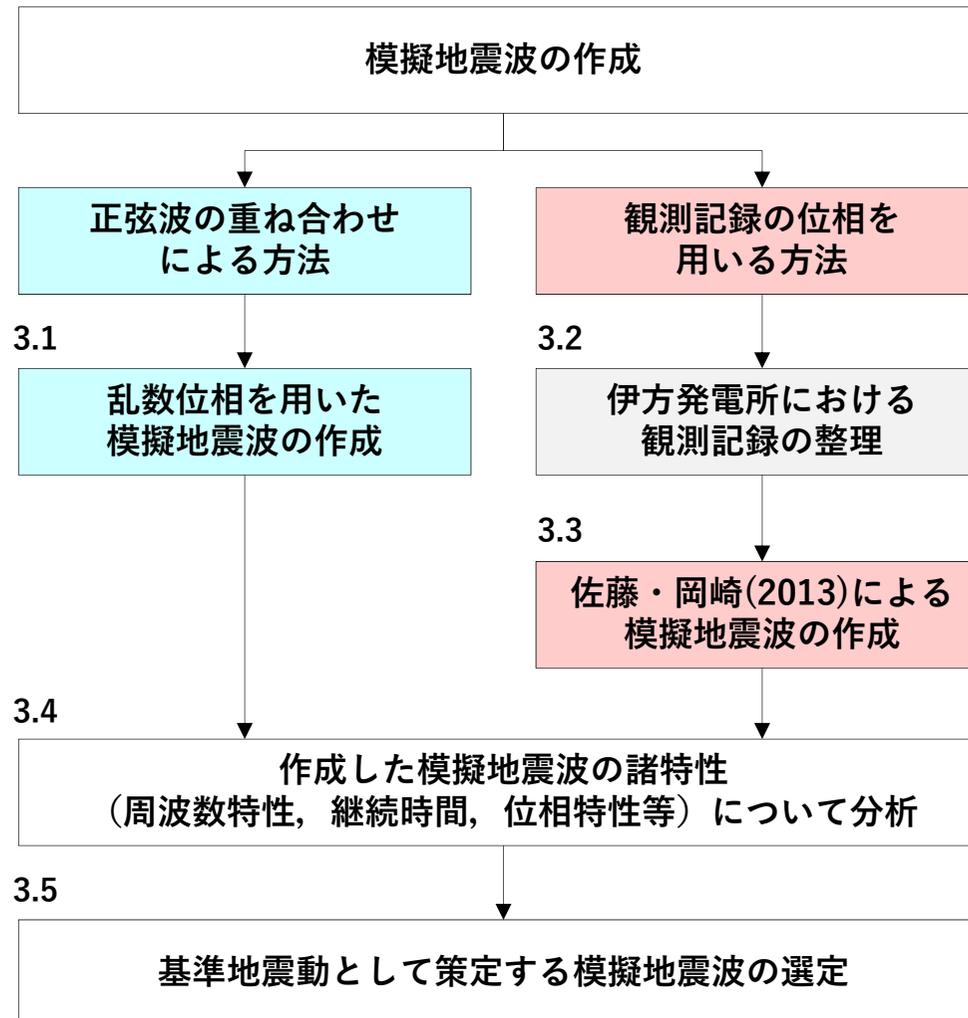
※2 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書

※3 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015

3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成

模擬地震波の検討フロー

- 震源を特定せず策定する地震動の模擬地震波の作成及び選定のフローを示す。
- 模擬地震波の作成にあたっては、位相特性の違いを考慮した模擬地震波を複数作成するとともに、作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性、継続時間、位相特性等）を分析する。
- それらの結果を踏まえ、基準地震動として策定する模擬地震波を選定する。



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱數位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

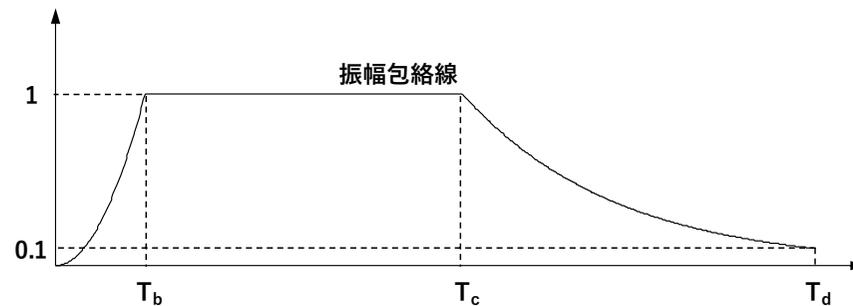
乱數位相の模擬地震波の作成諸元

- 乱數位相の模擬地震波は、基準地震動Ss-3-3（標準応答スペクトル）に適合する周波数-振動特性と一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせによって作成する。
- 振幅包絡線の経時変化については、Noda et al.(2002)に基づき設定する。

設計用 模擬地震波	地震規模 M	等価震源距離 Xeq(km)	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時変化 (s)		
				T _b	T _c	T _d
Ss-3-3H Ss-3-3V	6.9	10	28.03	3.31	15.06	28.03

※ 地震規模は、武村(1990)のMo-M関係及びKanamori(1977)のMo-Mw関係からMw=0.78M+1.08であり、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（Mw6.5程度未満）より、Mw6.5の場合のMは約6.9となる。
 等価震源距離は、震源近傍を想定し、Noda et al.(2002)における極近距離の関係（M6-Xeq6km, M7-Xeq12km）からM6.9-Xeq11kmとなる。これらの値は、「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」の距離減衰式を用いた検討（p19～p25）において、Noda et al.(2002)の評価で用いられている値（M6.9, Xeq10km）とも整合的であることから、標準応答スペクトルの検討との連続性を踏まえ、地震規模Mは6.9、等価震源距離Xeqは10kmを採用。

$$E(T) = \begin{cases} (T/T_b)^2 & (0 < T \leq T_b) \\ 1.0 & (T_b < T \leq T_c) \\ e^{\frac{\ln(0.1)}{T_d - T_c}(T - T_c)} & (T_c < T \leq T_d) \end{cases}$$



ここで、

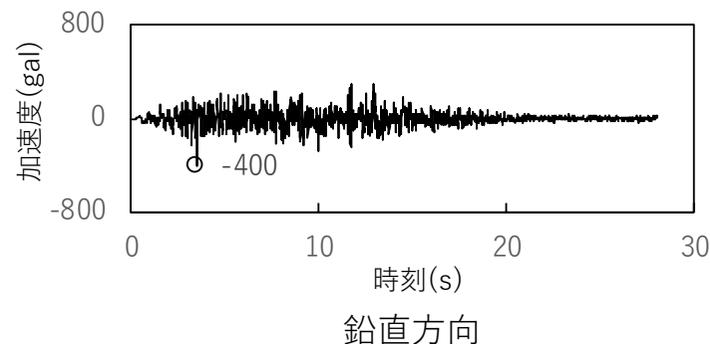
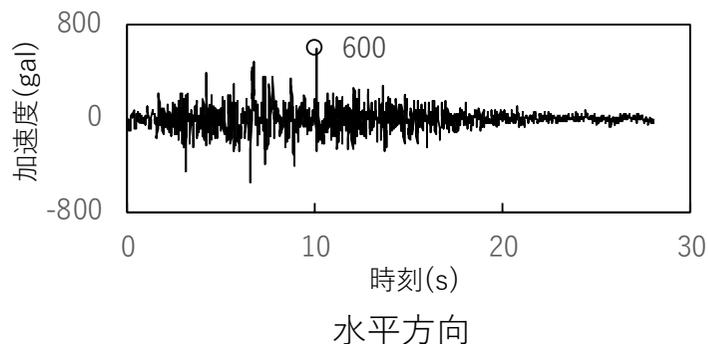
$$T_b = 10^{0.5M - 2.93} \quad (\text{立ち上がり部の継続時間})$$

$$T_c - T_b = 10^{0.3M - 1.0} \quad (\text{強震部の継続時間})$$

$$T_d - T_c = 10^{0.17M + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \quad (\text{減衰部の継続時間})$$

乱數位相の模擬地震波の作成結果（1/2）

■作成した模擬地震波



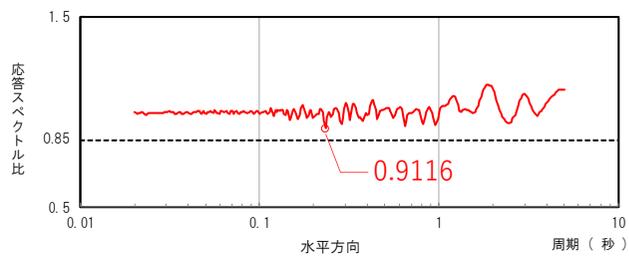
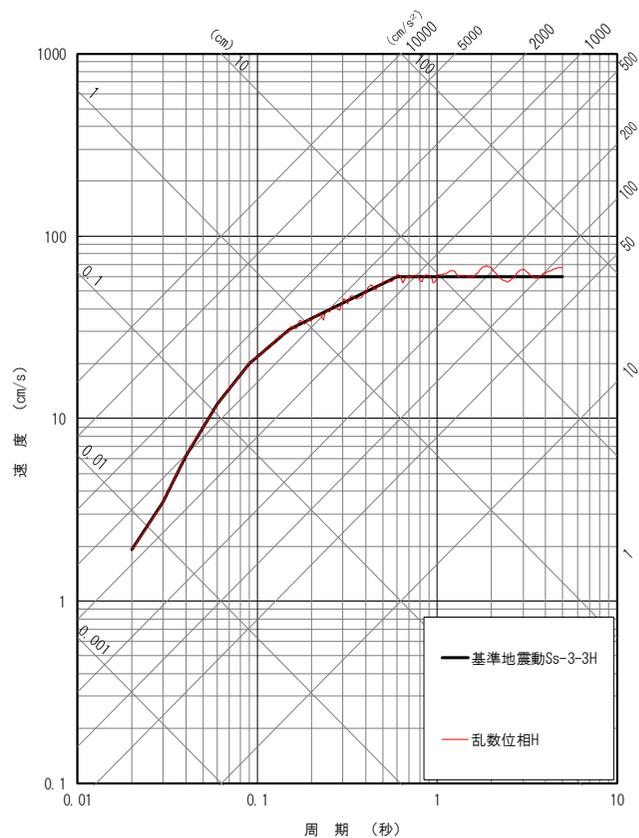
■適合度確認（スペクトル比は全周期帯の適合度のうちの最小値を示している）

	スペクトル比(R) (≧0.85)	スペクトル強度比(SI比) (≧1.0)
水平方向	0.9116	1.0217
鉛直方向	0.9038	1.0241
判定式	$R = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \quad (0.02 \leq T)$ <p> $S_{V1}(T)$: 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 T : 固有周期 </p>	$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt}$ <p> $S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値 $\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル値 T : 固有周期 </p>

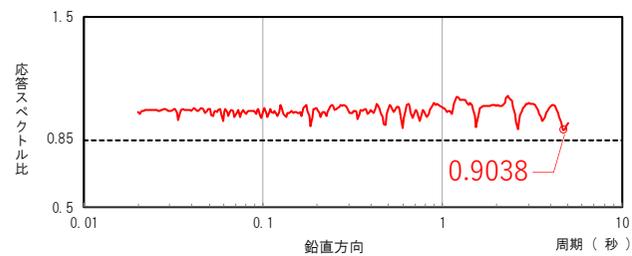
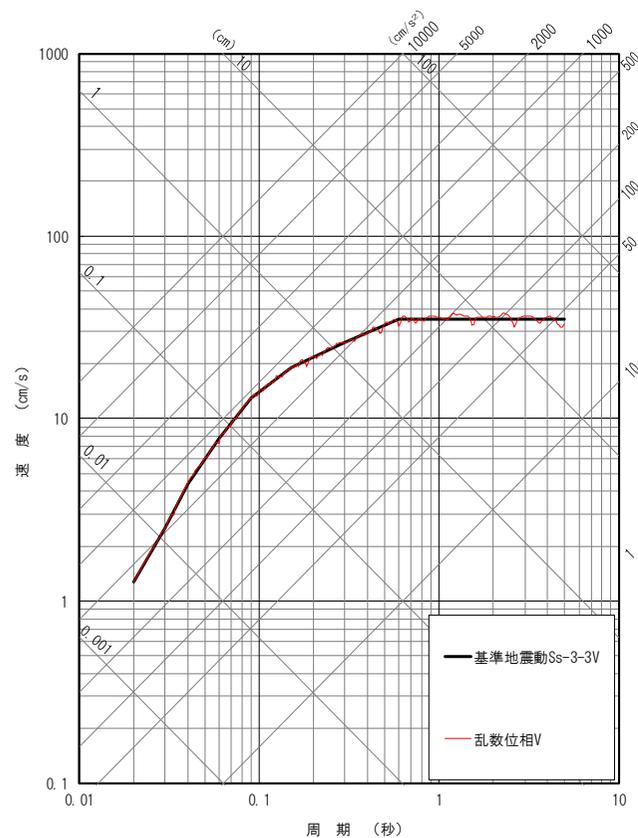
3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱数位相を用いた）模擬地震波の作成

乱数位相の模擬地震波の作成結果（2/2）

■作成した模擬地震波の応答スペクトルと応答スペクトル比



水平方向



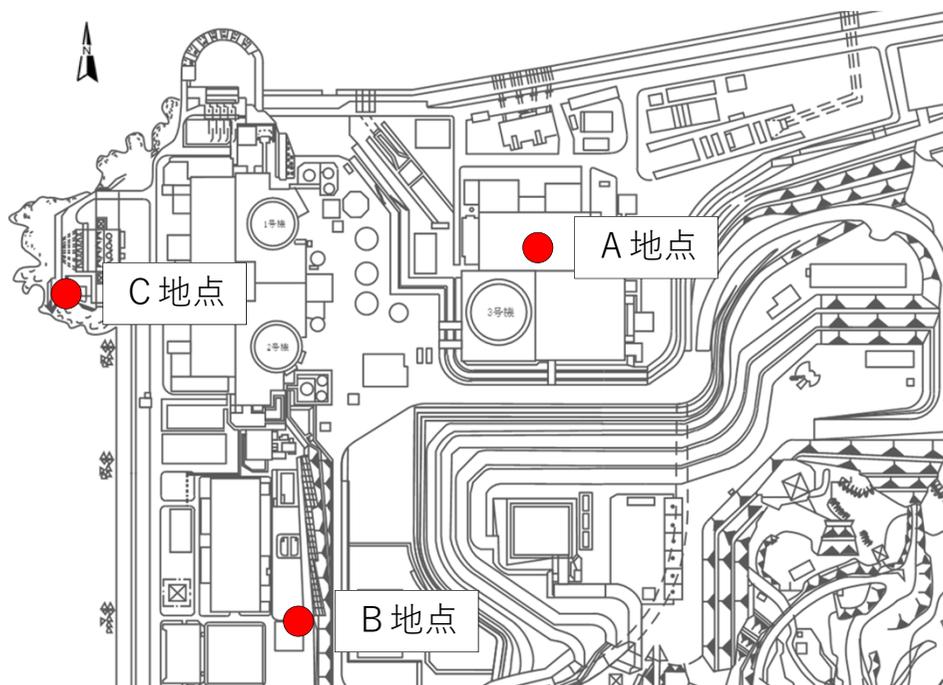
鉛直方向

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱數位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

伊方発電所の地震計配置

■地震計設置位置図（配置図・柱状図）

観測点	観測期間
A地点	1975～1982
B地点	1982～1994
C地点	1999～



標高 (m)	A地点		B地点		C地点	
	地震計	地層	地震計	地層	地震計	地層
+51	▽ GL	第四系				
	○ GL±0m					
+10		三波川 変成岩 類	▽ GL		▽ GL	
+5			○ GL-5m	三波川 変成岩 類	○ GL-5m	三波川 変成岩 類
-9	○ GL-60m					
			○ GL-80m		○ GL-80m	
-70						
			○ GL-160m		○ GL-160m	
-150						
-200						

※図中の「地層」はいずれも地震計設置時点の地層情報を表しており、A地点の地層情報は3号機建設前の情報である。

伊方発電所の地震計で観測された地震の一覧

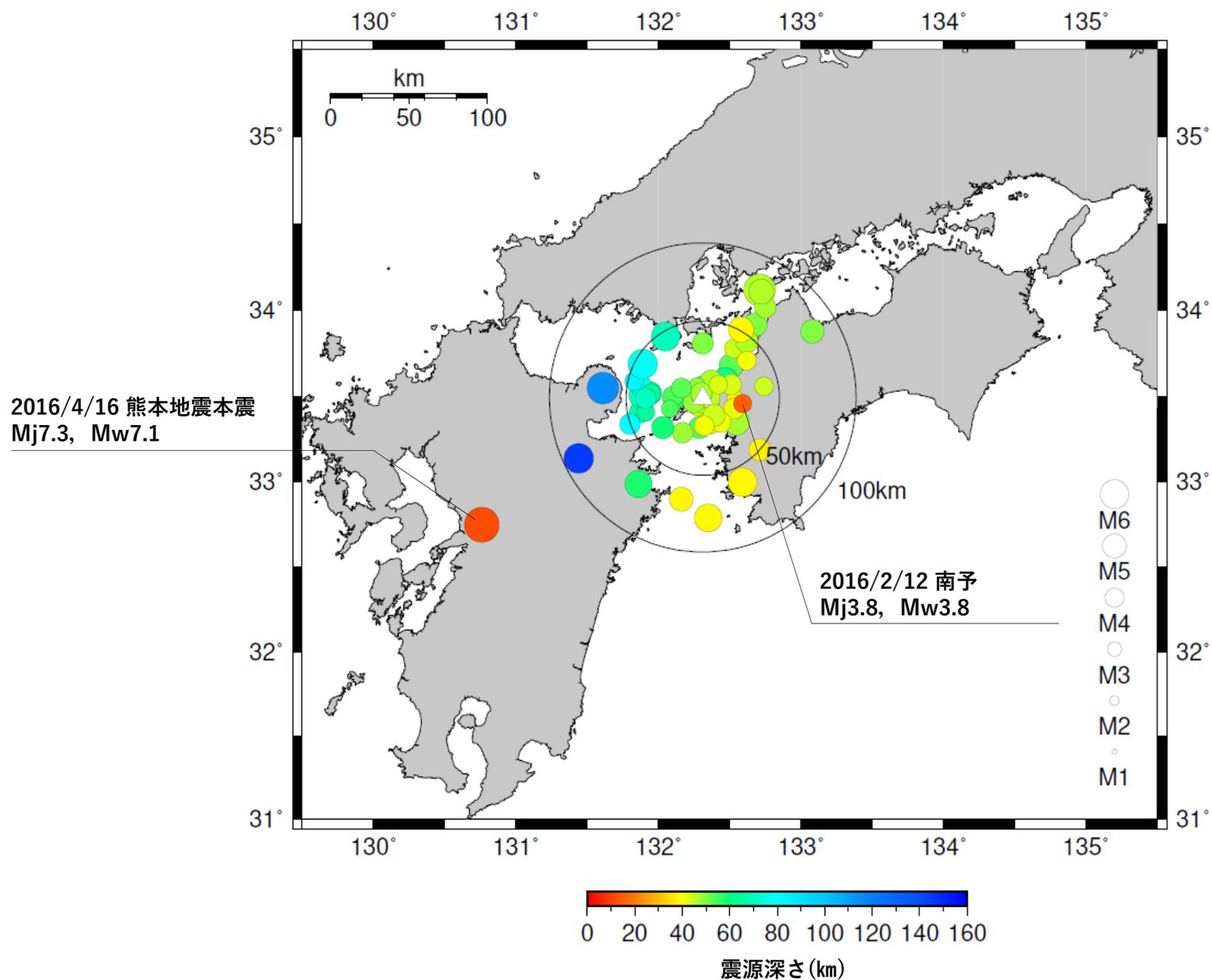
○伊方発電所の地震計で観測された地震のうち、**内陸地殻内地震**は、愛媛県南予で発生した地震（Mw3.8, No.55）及び2016年熊本地震（Mw7.1, No.56）が挙げられるが、愛媛県南予の地震は地震規模が小さく、熊本地震は敷地までの距離が遠い地震である。

○その他の地震は全て海洋プレート内地震であり、震源を特定せず策定する地震動の位相特性として適切ではない。

地震諸元 (JMA, F-net)									最大加速度 (gal)	地震諸元 (JMA, F-net)									最大加速度 (gal)
No	年月日	時刻	震央地名	地震タイプ	Mj	Mw	深さ (km)	No		年月日	時刻	震央地名	地震タイプ	Mj	Mw	深さ (km)			
1	1976/4/12	15:12	豊後水道	プレート内	4.5	-	43	4.5	A	32	2005/9/4	19:06	伊予灘	プレート内	4.3	4.2	54	5.4	C
2	1979/7/13	17:10	周防灘	プレート内	6.0	6.1	70	17.7	A	33	2006/2/1	12:15	伊予灘	プレート内	4.3	4.2	46	7.2	C
3	1982/10/25	17:56	大分県北部	プレート内	4.6	-	120	3.4	B	34	2006/5/28	20:36	伊予灘	プレート内	4.3	4.3	80	8.1	C
4	1982/12/10	9:32	松山沖	プレート内	4.9	-	50	5.2	B	35	2006/6/6	23:28	伊予灘	プレート内	3.6	3.7	49	11.5	C
5	1983/2/16	21:12	伊予灘	プレート内	4.1	-	48	3.5	B	36	2006/6/12	5:01	大分県西部	プレート内	6.2	6.4	145	34.1	C
6	1983/4/17	14:22	大洲付近	プレート内	3.4	-	39	2.3	B	37	2006/8/23	0:07	伊予灘	プレート内	3.6	3.6	54	8.0	C
7	1983/5/20	18:36	愛媛県東部	プレート内	4.9	-	50	4.9	B	38	2006/9/26	7:03	伊予灘	プレート内	5.3	5.3	70	19.3	C
8	1983/6/19	6:29	伊予灘	プレート内	4.9	-	73	6.7	B	39	2006/11/19	13:29	豊後水道	プレート内	4.2	4.2	41	10.4	C
9	1983/8/26	5:23	大分県北部	プレート内	6.6	6.5	116	31.3	B	40	2007/4/26	9:03	東予	プレート内	5.3	5.0	39	4.0	C
10	1984/10/3	6:28	伊予灘	プレート内	4.7	-	59	4.9	B	41	2009/1/25	2:33	伊予灘	プレート内	4.4	4.7	78	9.0	C
11	1985/5/13	19:41	愛媛県南西部	プレート内	6.0	5.5	39	22.6	B	42	2009/3/28	12:27	伊予灘	プレート内	3.9	4.0	83	6.5	C
12	1988/1/1	4:03	伊予灘	プレート内	4.9	-	59	19.9	B	43	2010/4/17	5:34	南予	プレート内	4.3	4.4	43	18.8	C
13	1988/3/3	5:28	伊予灘	プレート内	4.4	-	60	16.2	B	44	2011/6/29	23:36	伊予灘	プレート内	3.8	3.9	64	5.6	C
14	1988/7/29	18:59	伊予灘	プレート内	5.1	-	53	16.0	B	45	2012/5/25	4:43	伊予灘	プレート内	4.0	4.3	63	4.1	C
15	1991/1/4	3:36	伊予灘	プレート内	5.3	-	58	34.4	B	46	2012/9/8	10:41	伊予灘	プレート内	4.5	4.5	50	9.0	C
16	1993/8/14	10:29	愛媛県南西部	プレート内	5.3	-	47	13.1	B	47	2012/12/22	15:15	伊予灘	プレート内	4.5	4.4	47	12.3	C
17	1993/8/31	0:08	伊予灘	プレート内	5.1	-	62	14.0	B	48	2014/3/14	2:07	伊予灘	プレート内	6.2	6.3	78	91.1	C
18	1999/11/15	9:30	豊後水道	プレート内	3.5	3.6	44	5.8	C	49	2014/10/16	4:39	伊予灘	プレート内	4.0	4.0	41	5.0	C
19	2000/9/7	14:51	豊後水道	プレート内	4.3	4.1	45	7.4	C	50	2015/2/3	14:07	南予	プレート内	3.9	4.0	44	10.0	C
20	2001/1/5	5:15	安芸灘	プレート内	4.0	3.9	44	4.9	C	51	2015/7/3	4:55	伊予灘	プレート内	3.9	3.8	43	8.0	C
21	2001/1/9	13:37	伊予灘	プレート内	4.7	4.6	46	17.3	C	52	2015/7/13	2:52	大分県南部	プレート内	5.7	5.5	58	13.3	C
22	2001/3/24	15:27	安芸灘(芸予地震)	プレート内	6.7	6.8	46	86.4	C	53	2015/7/24	17:53	南予	プレート内	4.6	4.6	44	4.6	C
23	2001/3/25	19:19	安芸灘	プレート内	4.5	4.4	47	5.0	C	54	2015/8/21	16:54	豊後水道	プレート内	4.3	4.5	48	6.0	C
24	2001/3/26	5:40	安芸灘	プレート内	5.2	5.1	46	11.0	C	55	2016/2/12	11:46	南予	内陸地殻内	3.8	3.8	15	8.0	C
25	2001/4/25	23:40	日向灘	プレート内	5.8	5.7	39	6.7	C	56	2016/4/16	1:25	熊本県熊本	内陸地殻内	7.3	7.1	12	10.2	C
26	2002/3/25	22:58	安芸灘	プレート内	4.7	4.7	46	15.4	C	57	2016/8/15	13:37	伊予灘	プレート内	4.3	4.5	71	9.2	C
27	2002/4/6	1:57	愛媛県南西部	プレート内	4.4	4.4	42	15.4	C	58	2017/9/19	18:33	豊後水道	プレート内	4.2	4.4	41	6.7	C
28	2002/10/13	19:06	豊後水道	プレート内	4.9	4.8	43	5.2	C	59	2018/2/19	3:31	豊後水道	プレート内	5.0	5.1	39	13.4	C
29	2003/5/31	3:58	伊予灘	プレート内	4.5	4.3	65	5.2	C	60	2019/3/11	15:37	南予	プレート内	4.6	4.8	38	9.1	C
30	2004/4/20	22:26	伊予灘	プレート内	4.6	4.4	48	10.4	C	61	2020/3/9	4:28	豊後水道	プレート内	4.7	4.7	59	12.6	C
31	2005/5/25	20:31	豊後水道	プレート内	4.6	4.6	54	24.9	C	62	2021/2/23	16:08	伊予灘	プレート内	4.2	4.2	53	9.1	C

※ 最大加速度の欄のアルファベット（A～C）は観測された地震計の設置位置を示す。

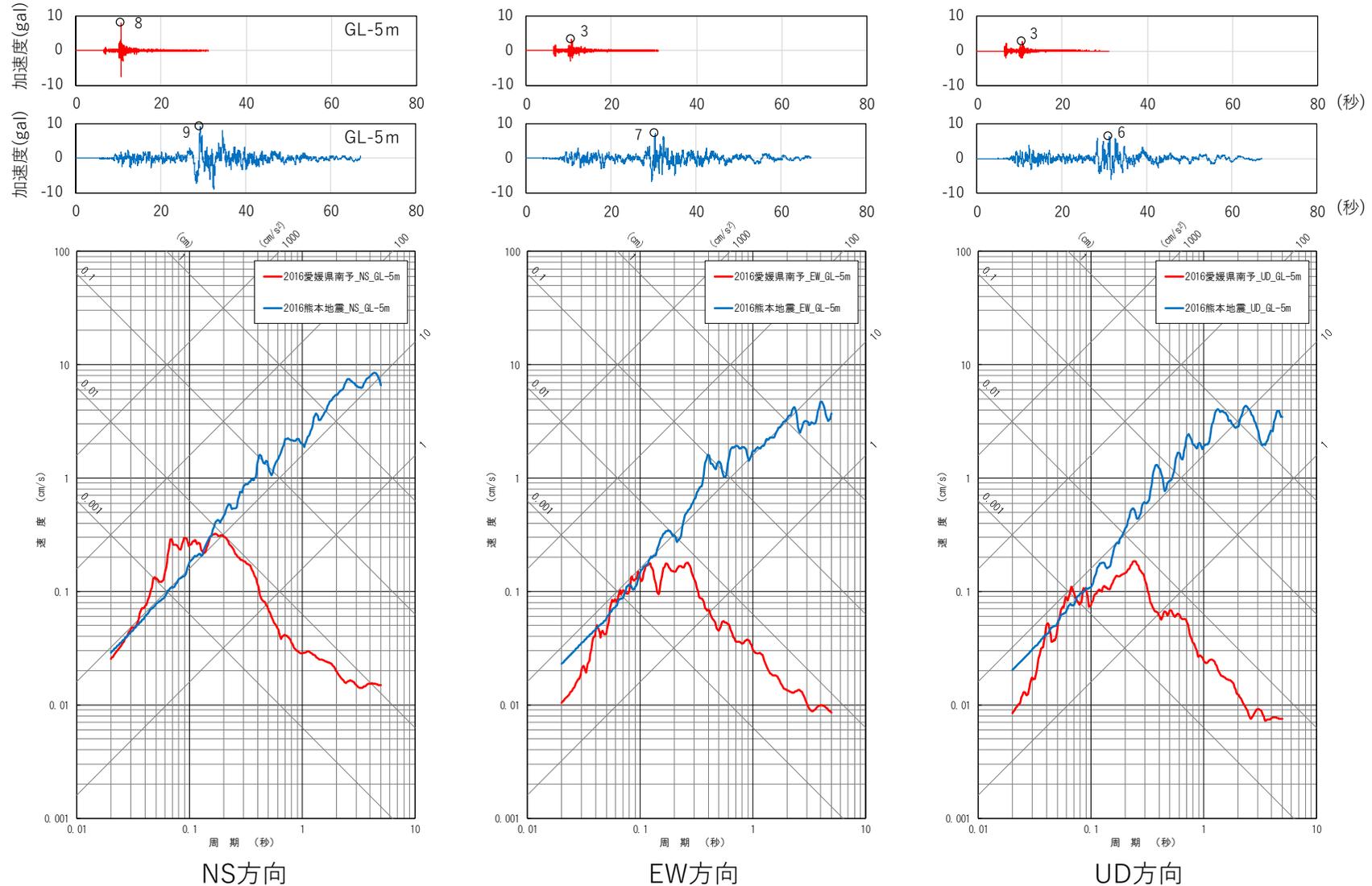
伊方発電所の地震計で観測された地震の一覧（震央分布）



伊方発電所の地震計で観測された内陸地殻内地震

— 2016年南予 Mw3.8
 — 2016年熊本地震 Mw7.1

- 2016年南予の地震(Mw3.8)は、標準応答スペクトル策定に用いられた地震の最小規模(Mw5.0)より有意に小さく、主要動も数秒程度と短い。2016年熊本地震本震は、震源が遠く表面波等による影響が考えられ、応答スペクトルの長周期成分が大きい。また、どちらも最大振幅が10ガル未満と小さい。
- いずれの記録も、震源を特定せず策定する地震動の位相特性として適切ではないため、その他の方法を検討する。



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱數位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 **群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成**
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

佐藤・岡崎(2013)による手法の概要

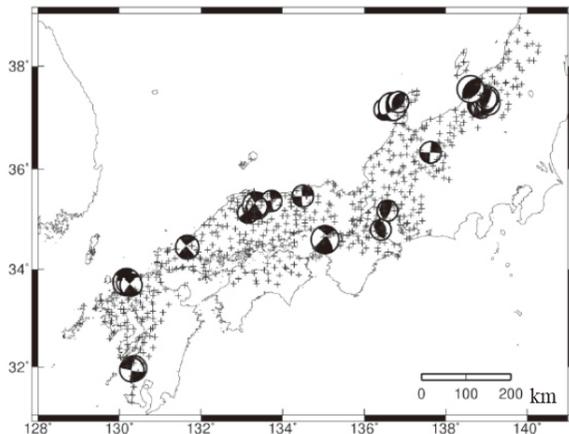
- 佐藤・岡崎(2013)は、Mw4.9~6.9, 震源距離5~200kmの内陸地殻内地震の地震観測データを基に、群遅延時間を用いた経時特性モデルを作成するとともに、周期依存の破壊伝播補正モデルを提案しており、**内陸地殻内地震の観測記録を用いた手法**である。
- 本手法は、想定する地震の地震モーメント・震源距離・地盤種別（1種地盤, 2種地盤, 3種地盤, Vs=700m/s程度の解放基盤の4種）をパラメータとして設定した経時特性モデル（群遅延時間）を、断層面・破壊開始点と評価地点との位置関係をパラメータとして設定した破壊伝播補正モデル（補正係数）によって補正を行う手法である。

■経時特性モデル（群遅延時間）

$$Z(f) = A(f)M_0^{1/3} + B(f)X + C_j(f)$$

- A,B,C：回帰係数（Cはサイト係数）
- M₀：地震モーメント（dyne-cm）
- X：震源距離（km）
- Z：経時特性モデル（群遅延時間）
- f：周波数

■経時特性モデル作成に用いられた内陸地殻内地震



■破壊伝播補正モデル（経時特性モデルの補正係数）

$$\log_{10}(FP/FN) = q_i \log_{10}(FN_i/FP_i)$$

- FP, FN：断層平行方向, 断層直交方向
- q：回帰係数
- i：地震タイプ（横ずれ断層, 逆断層）

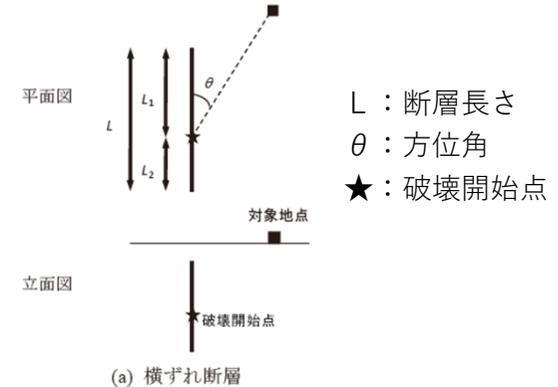
■破壊伝播補正モデルに用いた地震

表1 経時特性の破壊伝播補正モデルに用いる地震の諸元とパラメータ¹⁵⁾

横ずれ断層	地震規模			震源(破壊開始点)位置			断層パラメータ				
	M _J	M _w	M ₀ dyne・cm	緯度 度	経度 度	深さ km	L km	L ₁ km	L ₂ km	走向 度	傾斜角 度
1995年兵庫県南部地震	7.3	6.9	3.30E+26	34.60	135.04	16.4	55.0	35.0	20.0	53.0	90.0
1997年3月鹿児島県北西部の地震	6.6	6.1	1.50E+25	31.97	130.39	7.6	15.0	7.5	7.5	280.0	90.0
2000年鳥取県西部地震	7.3	6.7	1.61E+26	35.27	133.35	7.8	26.0	13.0	15.0	145.0	90.0
2005年福岡県西方沖地震	7.0	6.6	1.15E+26	33.75	130.16	14.0	26.0	15.0	11.0	122.0	93.0
逆断層	地震規模			震源(破壊開始点)位置			断層パラメータ				
	M _J	M _w	M ₀ dyne・cm	緯度 度	経度 度	深さ km	W km	W ₁ km	W ₂ km	走向 度	傾斜角 度
2004年新潟県中越地震	6.8	6.6	1.07E+26	37.31	138.84	10.6	18.0	13.0	50.0	212.0	47.0
2007年新潟県中越沖地震	6.8	6.7	1.20E+26	37.54	138.62	9.0	24.0	10.0	14.0	34.0	36.0

佐藤智美・岡崎敦：地震動の経験的経時特性モデルの破壊伝播補正モデルと周期間相関モデルの導入, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第684号, 289-298, 2013.

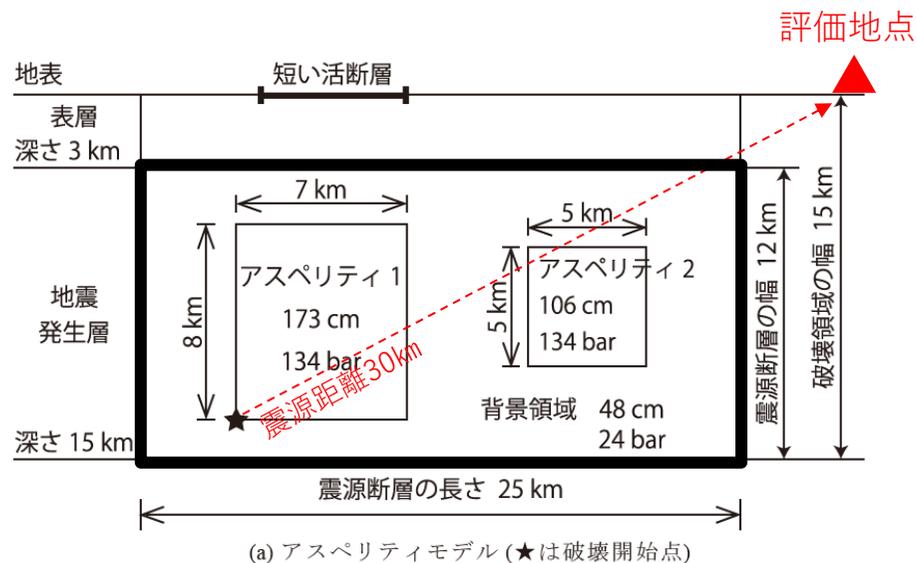
■破壊伝播補正モデル作成に必要なパラメータ



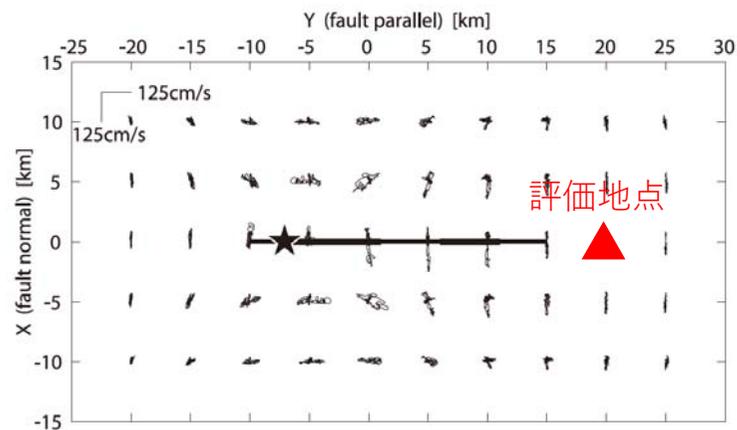
佐藤・岡崎(2013)による手法を用いた模擬地震波の作成

- 群遅延時間を考慮した模擬地震波として、震源を特定せず策定する地震動が観測記録に基づく地震動であることを踏まえ、**観測記録の回帰分析に基づく手法である佐藤・岡崎(2013)の手法**を用いた模擬地震波を作成する。
- 佐藤・岡崎(2013)の手法を用いた模擬地震波の作成にあたって必要なパラメータを下記のとおり設定する。
 - ・断層モデル及び地震モーメントは、震源を特定せず策定する地震動に相当するものとして、「**短い活断層から想定される地震による強震動予測**」について検討した**壇ほか(2010)**による諸元を用いることとし、伊方発電所周辺で発生する内陸地殻内地震の断層タイプを踏まえ、横ずれ断層を想定する。
 - ・評価地点は、壇ほか(2010)で用いられた評価地点のうち、**指向性パルスが生じる可能性を考慮し、下図のような破壊伝播方向の評価地点**とし、地盤種別は解放基盤とする。

■断層モデルと評価地点（壇ほか(2010)に加筆）



断面図

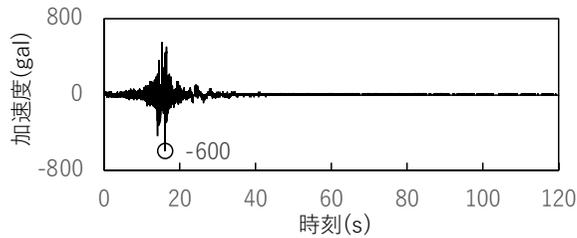


平面図

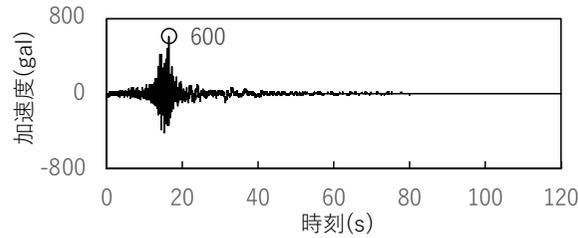
地震モーメント : $7.0 \times 10^{18} \text{Nm}$ (壇ほか(2010)による設定値)

群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成結果 (1/2)

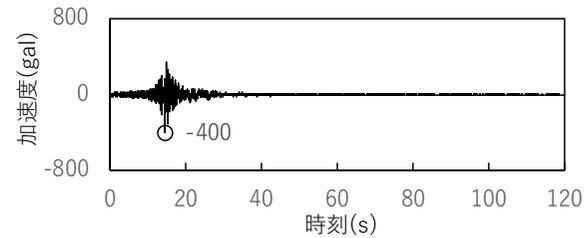
■作成した模擬地震波 FN方向：断層直交方向(Fault Normal), FP方向：断層平行方向(Fault Parallel)



FN方向



FP方向



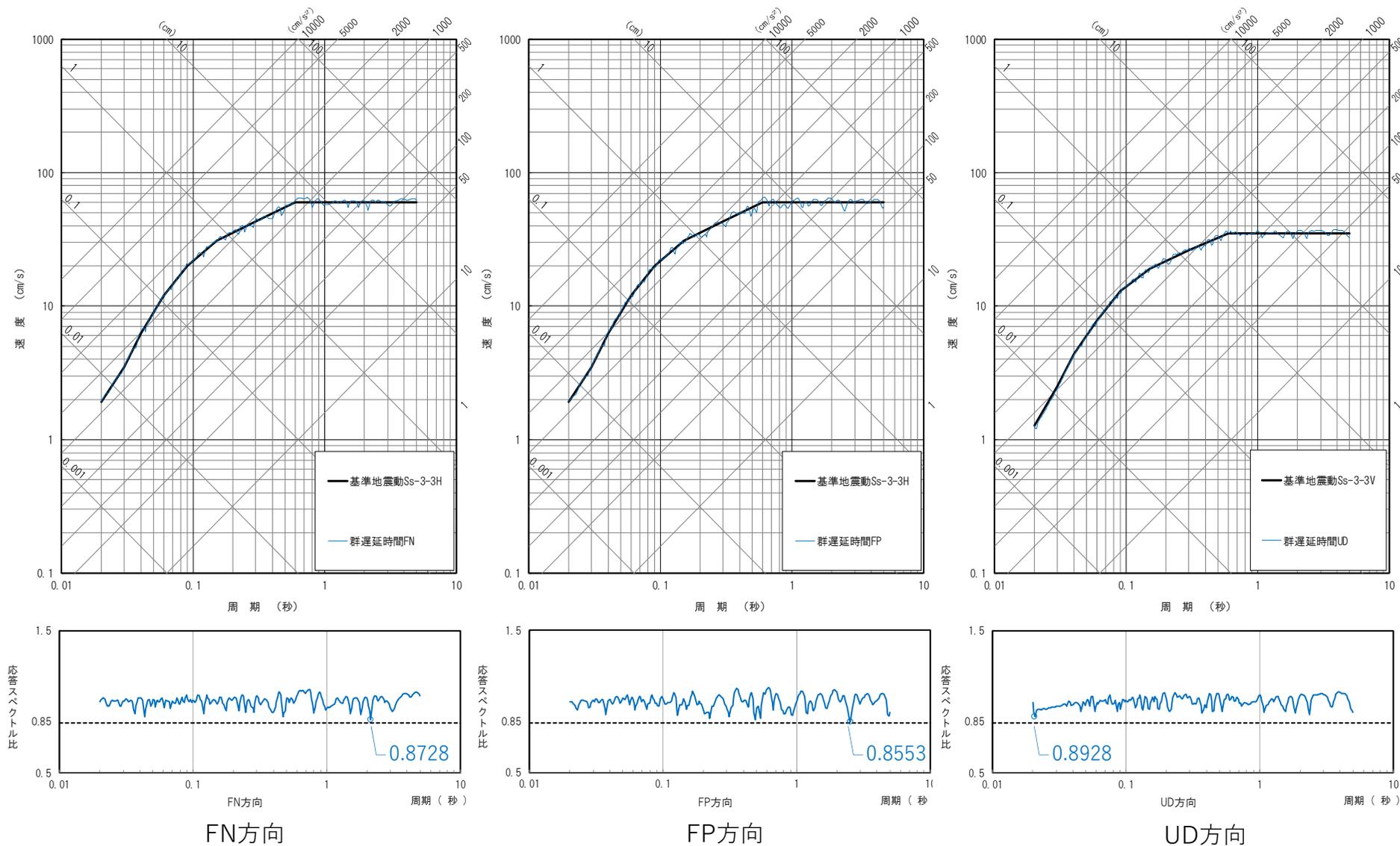
UD方向

■適合度確認 (スペクトル比は全周期帯の適合度のうちの最小値を示している)

	スペクトル比(R) (≥ 0.85)	スペクトル強度比(SI比) (≥ 1.0)
FN方向	0.8728	1.0002
FP方向	0.8553	1.0016
UD方向	0.8928	1.0001
判定式	$R = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \quad (0.02 \leq T)$ <p> $S_{V1}(T)$: 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 T : 固有周期 </p>	$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt}$ <p> $S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値 $\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル値 T : 固有周期 </p>

群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成結果 (2/2)

■作成した模擬地震波の応答スペクトルと応答スペクトル比

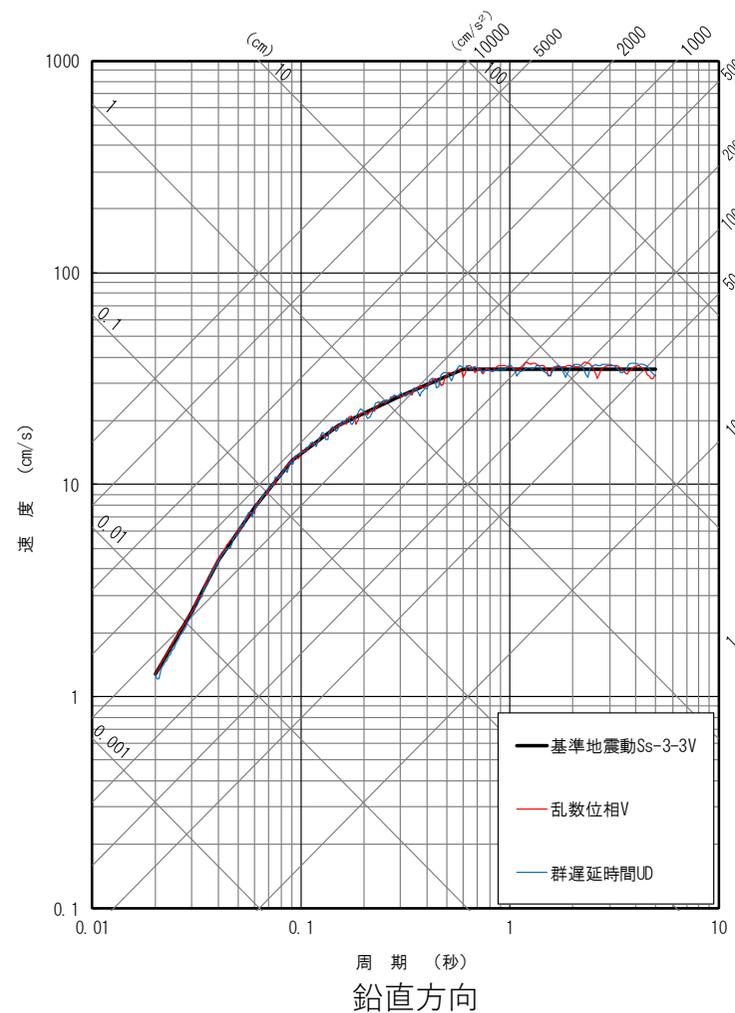
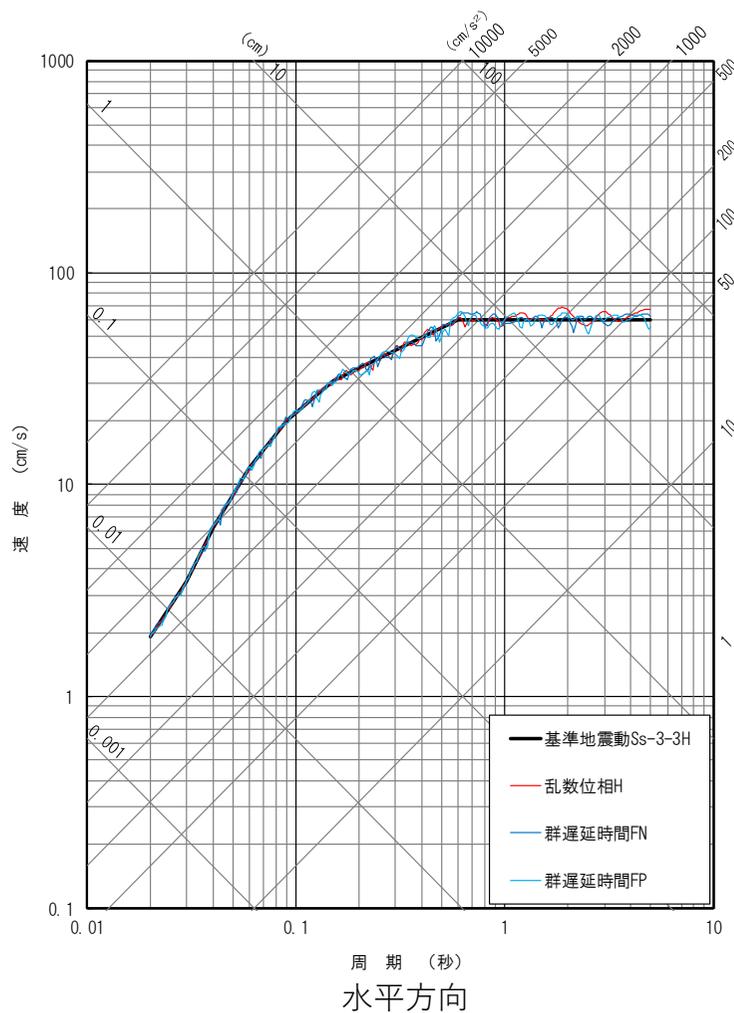


-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱數位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析

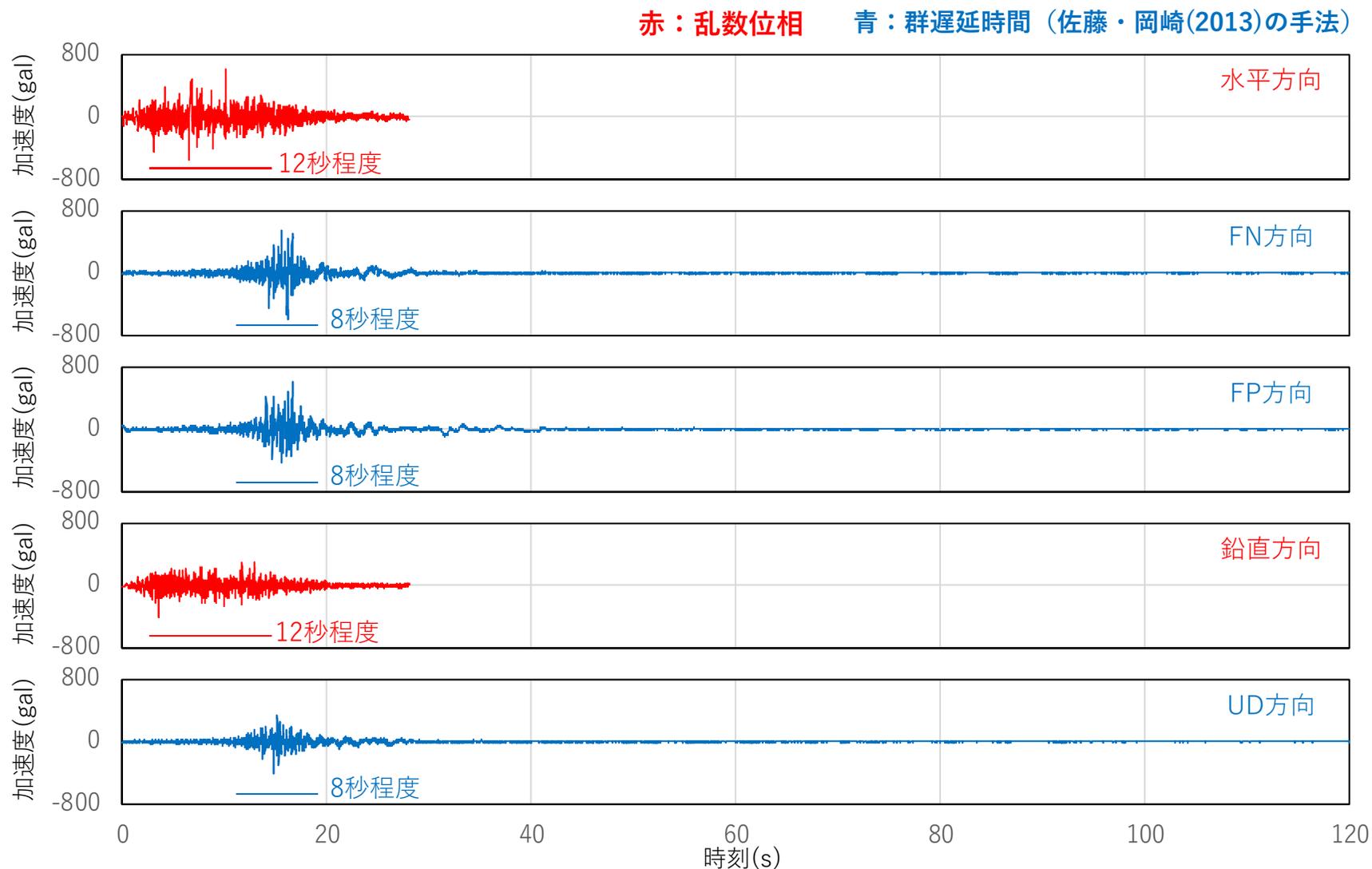
模擬地震波の諸特性の分析 – 周波数特性の比較

- 設置許可基準規則の記載（設定された応答スペクトルに対して，地震動の継続時間及び経時的変化等の特性を適切に考慮すること）を踏まえ，作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）を分析する。
- 周波数特性については，同じ応答スペクトルをターゲットとしているため差異がない。



模擬地震波の諸特性の分析 – 時刻歴波形（継続時間等）の比較

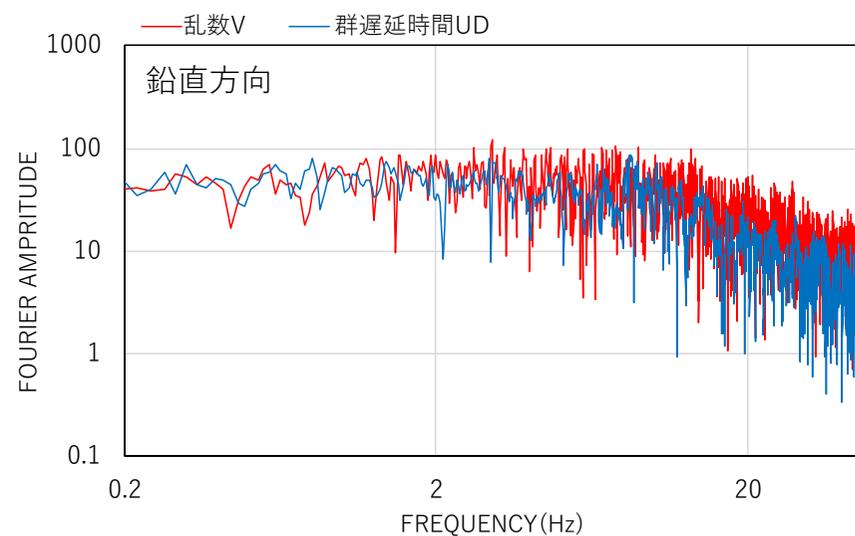
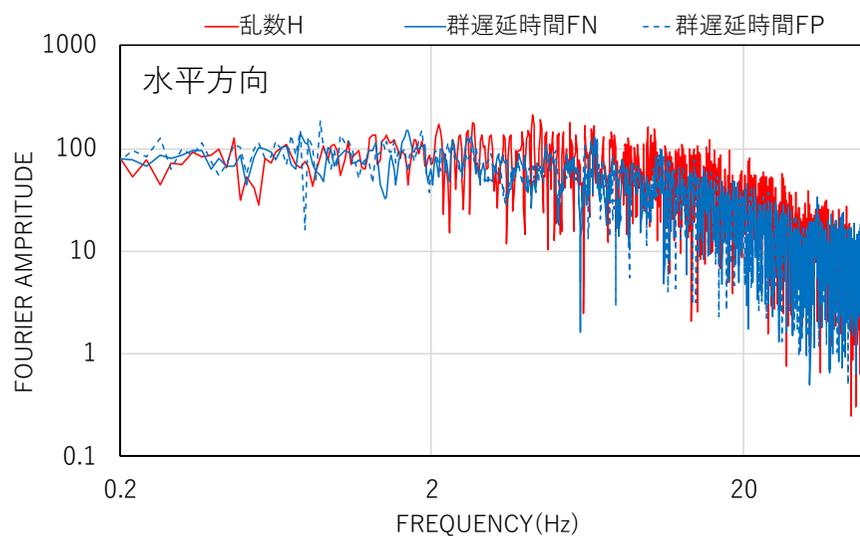
- 時刻歴波形で比較すると，乱数位相の模擬地震波の方が比較的振幅の大きい波の継続時間が長い。
（乱数位相が12秒程度，群遅延時間は8秒程度）
- 佐藤・岡崎(2013)による群遅延時間を考慮した模擬地震波は，20秒以降に長周期成分に富む波形が見られるが，主要動と比較してその振幅は小さい。



模擬地震波の諸特性の分析 – フーリエ振幅スペクトルの比較

- フーリエ振幅スペクトルで比較すると，乱数位相の模擬地震波の方がフーリエ振幅スペクトルのばらつきがやや大きいものの，両者に顕著な差はない。

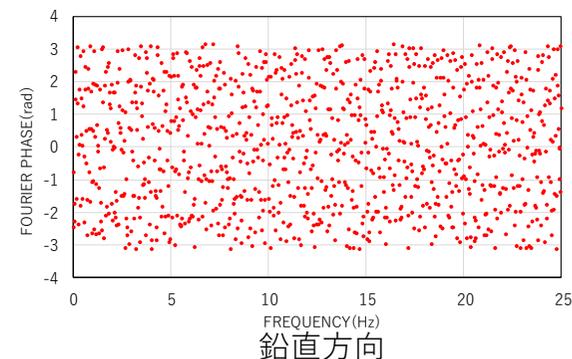
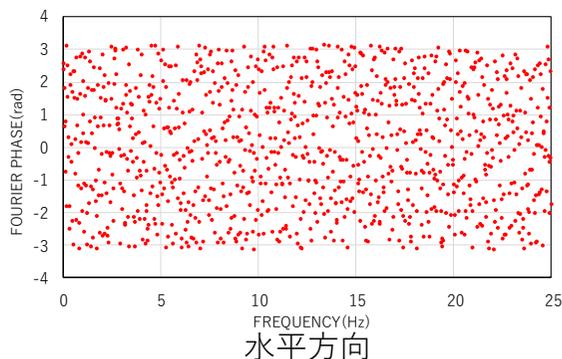
赤：乱数位相 青：群遅延時間（佐藤・岡崎(2013)の手法）



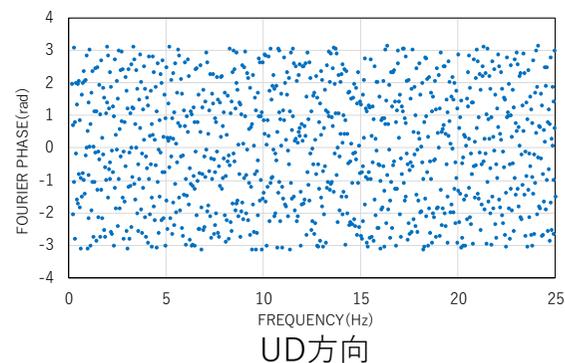
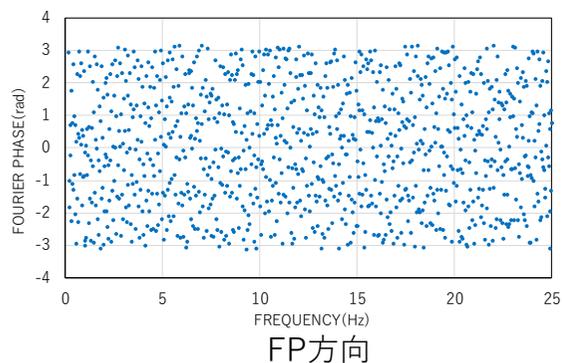
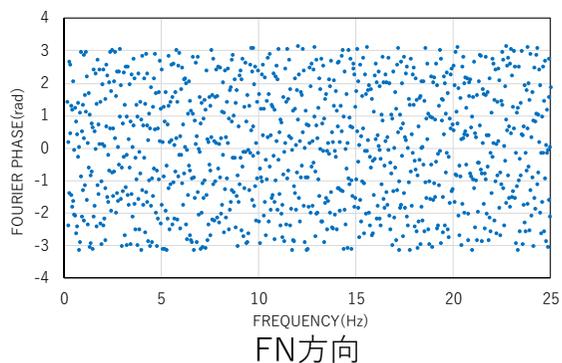
模擬地震波の諸特性の分析 – フーリエ位相スペクトルの比較

- フーリエ位相スペクトルで比較すると，両者とも模擬地震波に目立った特徴はなく（位相特性のまとまりなどがなく），両者に顕著な差はない。

乱数位相



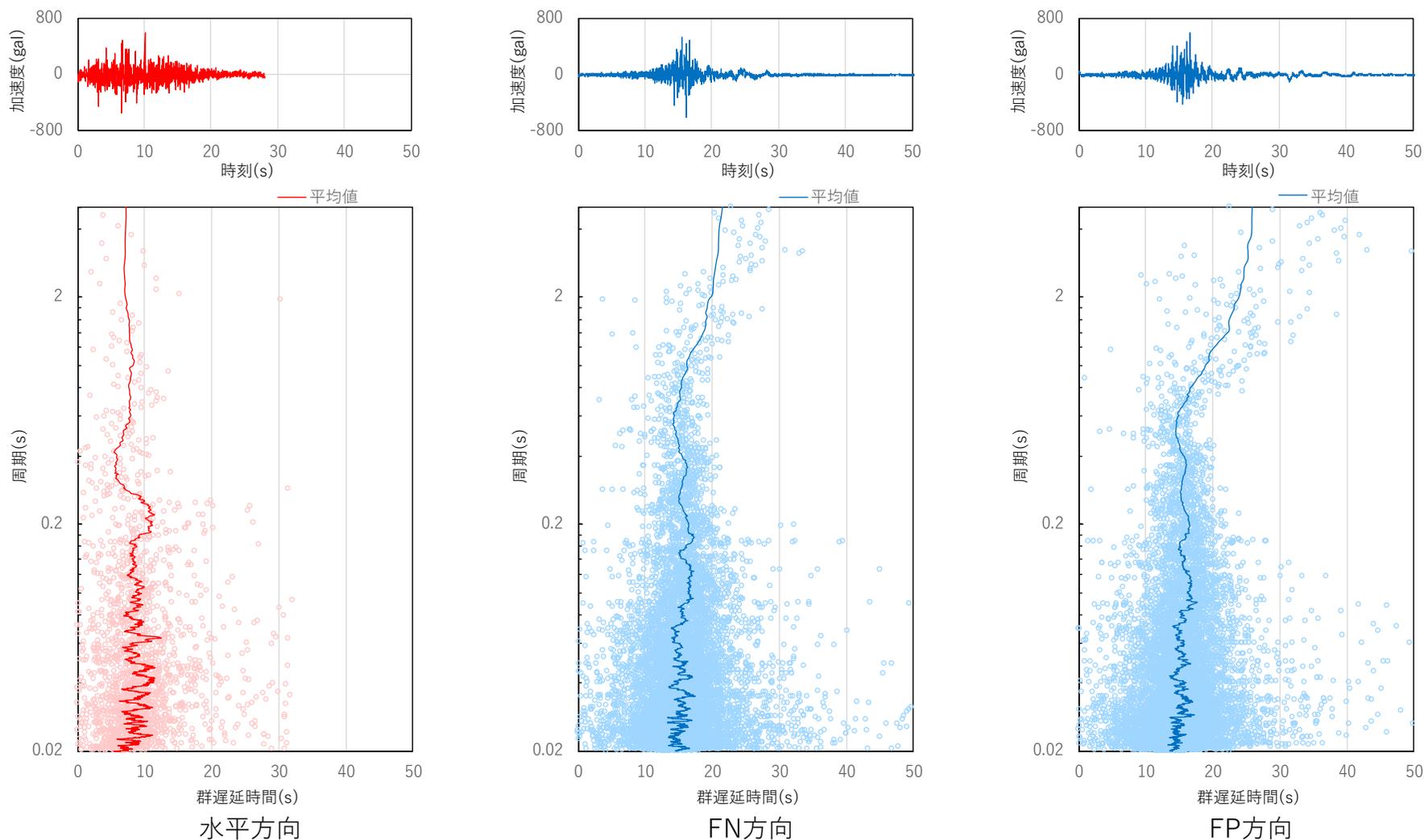
（佐藤・岡崎2013）
群遅延時間



模擬地震波の諸特性の分析 – 群遅延時間の比較 (1/2)

- 群遅延時間で比較すると，佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波（水平方向）は，FN方向・FP方向共に後続波に周期0.7秒程度以上の長い周期成分が富む傾向にあるが，原子力発電所の設計に影響の大きい短周期側については，主要動の中心付近に群遅延時間が集中しており，両者に大きな差異はない。

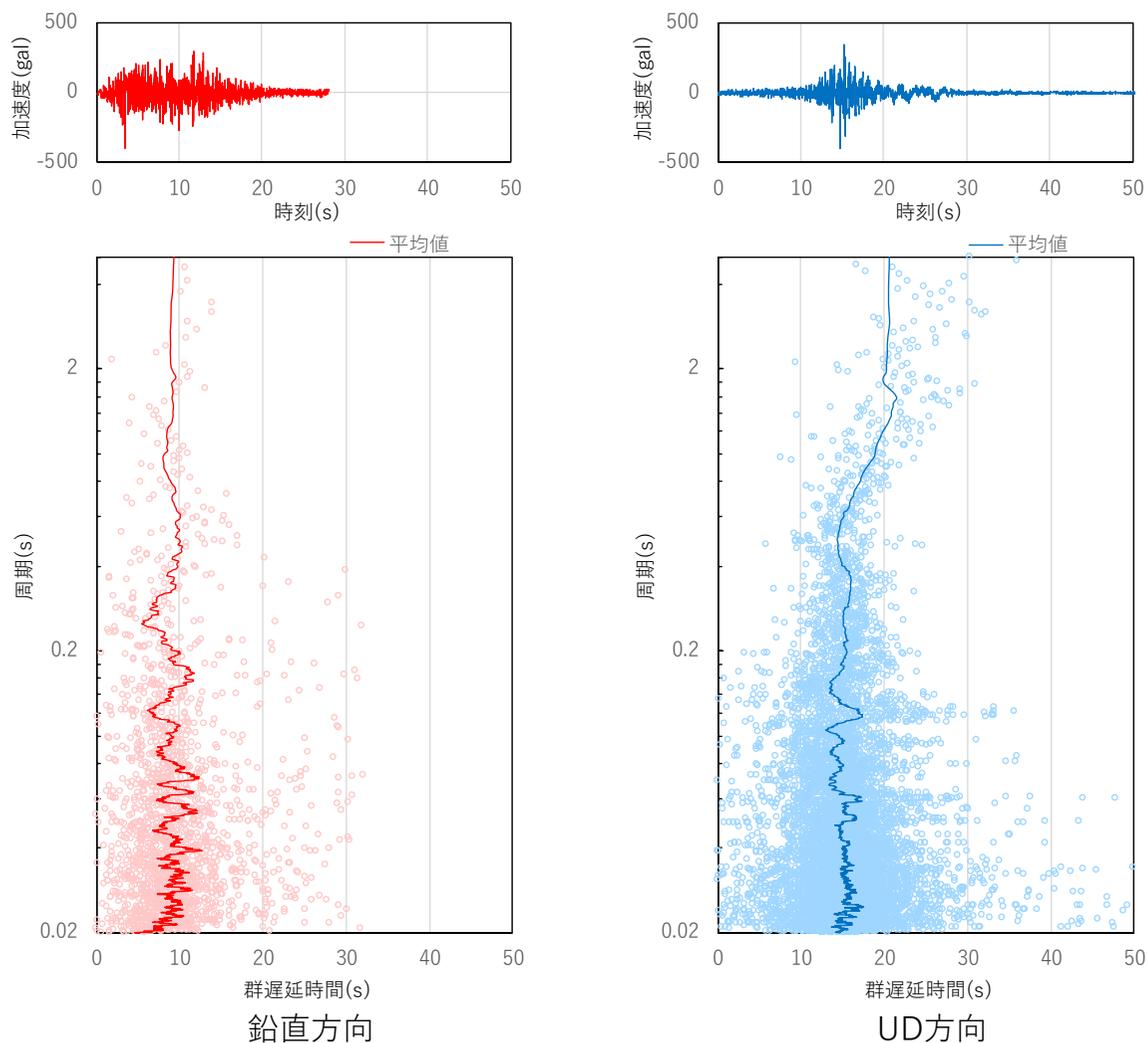
■水平方向（FN方向・FP方向） 赤：乱数位相 青：群遅延時間（佐藤・岡崎(2013)の手法）



模擬地震波の諸特性の分析 – 群遅延時間の比較 (2/2)

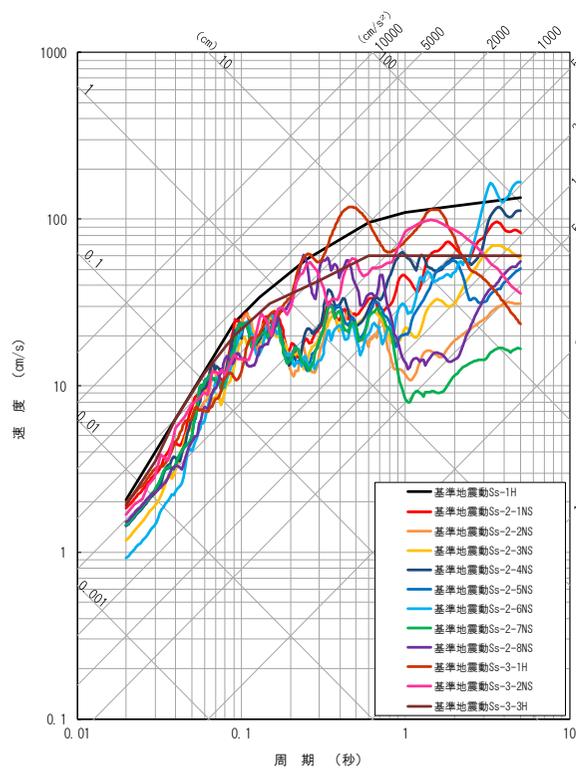
○鉛直方向も同様に，佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波は，後続波に周期0.7秒程度以上の長い周期成分が富む傾向にあるが，原子力発電所の設計に影響の大きい短周期側については，主要動の中心付近に群遅延時間が集中しており，両者に大きな差異はない。

■鉛直方向 (UD方向) 赤：乱数位相 青：群遅延時間 (佐藤・岡崎(2013)の手法)

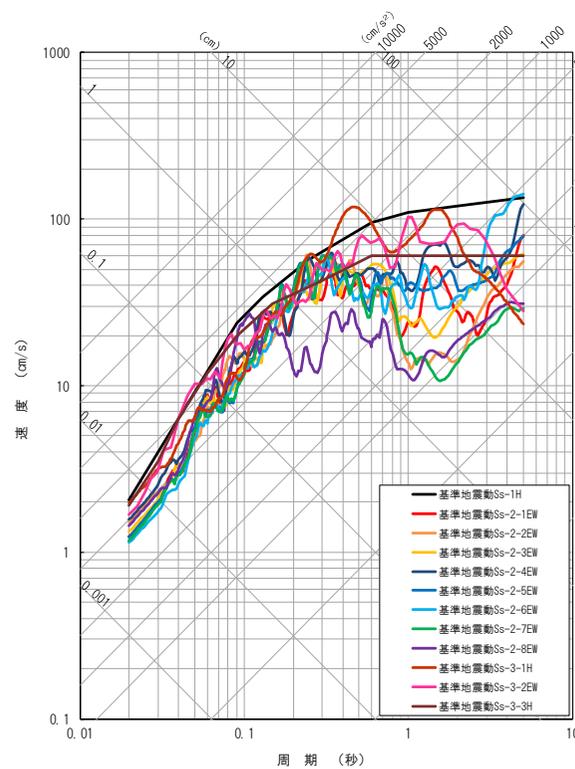


模擬地震波の諸特性の分析 —位相特性の違いによる塑性応答への影響に関する分析

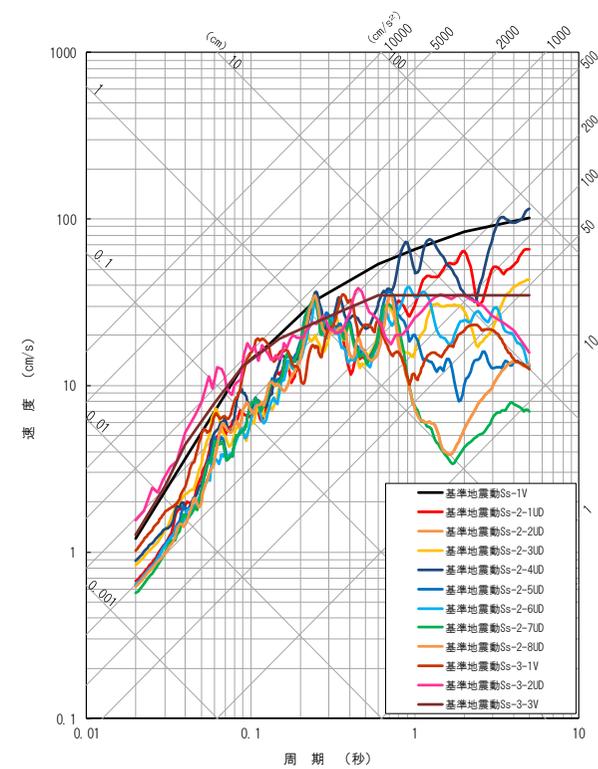
- 施設に作用する地震力が大きく塑性応答の影響が支配的となるのは水平方向であるところ，Ss-3-3Hは全周期帯でSs-1Hの地震動レベルより小さく，また，長周期側ではSs-3-1Hなどの地震動レベルより小さいことから，Ss-3-3Hの位相特性の違いによる塑性応答への影響はそれらの基準地震動の応答でカバーされると考えられる。
- しかしながら，検討チームの議論（弾塑性の時刻歴応答解析においては位相の与え方にも留意する必要がある）を踏まえ，1質点系弾塑性モデルを用い，乱数位相及び佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波の塑性応答の違いを検討する。



NS方向



EW方向



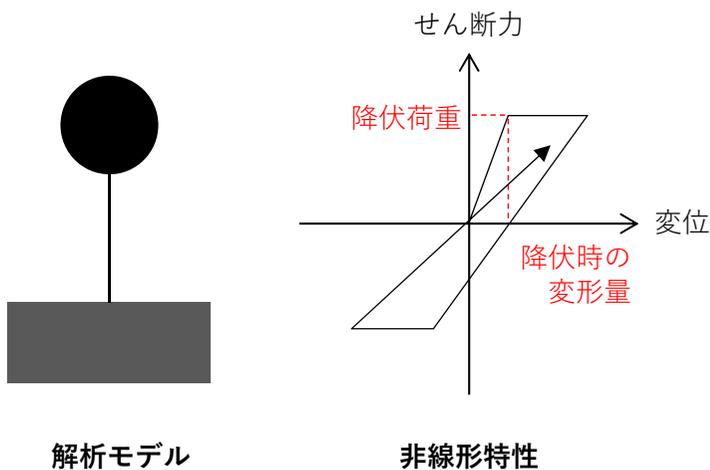
UD方向

模擬地震波の諸特性の分析 — 1 質点系弾塑性モデルによる塑性応答の比較

- 1 質点系弾塑性モデルを用いて最大塑性率（最大変形量／降伏時の変形量）を評価した結果，位相特性の違いによりばらつく傾向があるが，乱数位相の模擬地震波の最大塑性率が佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波と比較して，周期0.3秒程度より短い周期帯では大きく，周期0.3秒程度より長い周期帯では同等である。

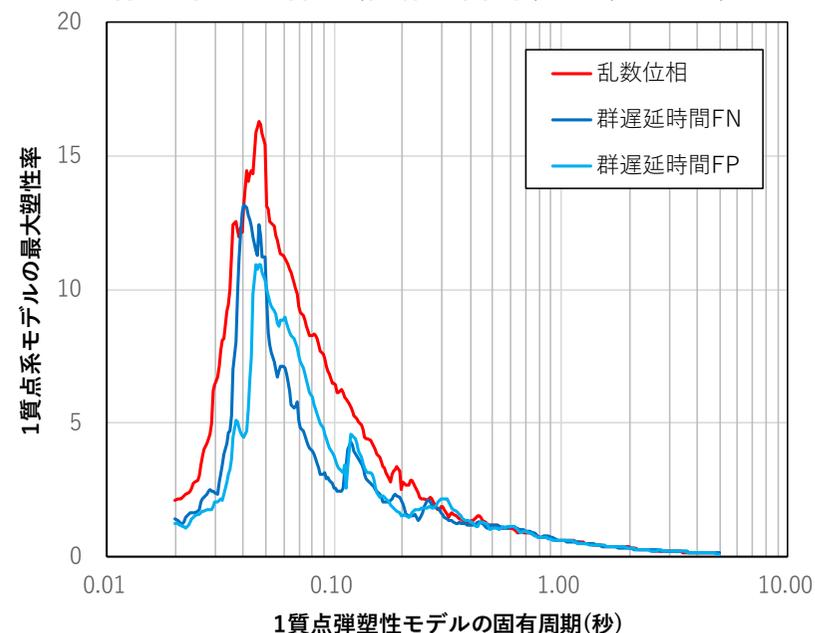
■ 応答比較に用いるモデル

- ・モデル : 1質点系弾塑性モデル
- ・非線形特性 : 最大点指向型バイリニア
- ・降伏比 : 0.6（質点重量に対する降伏荷重の比率）
- ・減衰 : 5%
- ・固有周期 : 0.02～5秒の間で複数設定
- ・応答値 : 最大塑性率（最大変形量／降伏時の変形量）



■ 応答値（最大塑性率）の比較結果

赤：乱数位相
青：群遅延時間（佐藤・岡崎(2013)の手法）



-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. **基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成**
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱数位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 **基準地震動として策定する模擬地震波の選定**
 4. まとめ

3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定

模擬地震波の作成結果のまとめ

- 設置許可基準規則の解釈の記載への適合性を確認するため、審査ガイドの記載を踏まえて実施した検討、ならびに、検討チーム会合における議論を参考にして実施した検討は以下のとおりである。
- これらの検討結果を踏まえ、基準地震動として策定する模擬地震波の選定を行う。

■審査ガイドの記載を踏まえて実施した検討

審査ガイドの記載	検討結果
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経時的变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。	<ul style="list-style-type: none"> ・審査実績の多い乱數位相を用いた模擬地震波に加え、観測位相を用いた模擬地震波についても検討した。【12～25頁】 ・模擬地震波の諸特性について分析を行い、特徴に大きな差はないものの、乱數位相の模擬地震波の方が佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波より主要動の継続時間が長いことを確認した。【26～34頁】

<参考> 検討チーム会合における議論を参考にして実施した検討

No.	【検討チーム会合における議論】	検討結果
1	加速度時刻歴波形を作成する際には、最大加速度よりも、応答スペクトルにフィッティングさせることが大切である。	・作成した模擬地震波はいずれも応答スペクトルへの適合度を満足することを確認した。【14～15頁, 24～25頁】
2	震源を特定せず策定する地震動は、新規制基準において観測記録を基に策定されている旨の記載がなされていることから、加速度時刻歴波形の位相は、できるだけ観測記録に近いものを使うことが重要と考えられる。	<ul style="list-style-type: none"> ・伊方発電所では適切な観測記録が得られていない。【16～20頁】 ・このため、その他の方法として、佐藤・岡崎(2013)の群遅延時間モデルを用いた検討を実施した。【21～25頁】
3	そのサイトで観測された記録を重視するという考えは良い。ただし、実観測記録を用いて加速度時刻歴波形を作成する際には、小さなマグニチュードの地震から得られた位相特性がそのまま使えるか等の整理が必要である。	・内陸地殻内地震の多数の記録を用いた佐藤・岡崎(2013)の群遅延時間モデルを用いた模擬地震波を作成した。【21～25頁】
4	ある地点の一つの波の位相を用いると、その記録のサイト特性が際立つため、標準応答スペクトル策定の考え方との整合性がなくならないように留意する必要がある。	・佐藤・岡崎(2013)の群遅延時間モデルにおいて、指向性パルスが生じる可能性を考慮し、破壊伝播方向の模擬地震波を作成した。【21～25頁】
5	断層の近傍では指向性パルスが生じる可能性があり、今後、Mw6.5程度の地震でパルス波が発生する可能性も考慮しておくことが望ましい。	・1質点系弾塑性モデルによる最大塑性率の違いを検討した結果、乱數位相の模擬地震波の最大塑性率が佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波と比較して、周期0.3秒程度より短い周期帯では大きく、周期0.3秒程度より長い周期帯では同等であることを確認した。【33～34頁】
6	弾塑性の時刻歴応答解析においては位相の与え方にも留意する必要がある。	

模擬地震波の選定

■作成した模擬地震波の特徴

- 作成した模擬地震波の地震動レベル（周波数特性），フーリエ振幅・フーリエ位相及び群遅延時間は同等であり，大きな差はないものの，乱數位相による模擬地震波が佐藤・岡崎(2013)の群遅延時間モデルによる模擬地震波より主要動の継続時間が長い。【26～32頁】

■位相特性の違いによる塑性応答への影響に関する分析

- 施設に作用する地震力が大きく塑性応答の影響が支配的となるのは水平方向であるところ，Ss-3-3Hは全周期帯でSs-1Hの地震動レベルより小さく，また，長周期側ではSs-3-1Hなどの地震動レベルより小さいことから，Ss-3-3Hの位相特性の違いによる塑性応答への影響はそれらの基準地震動の応答でカバーされると考えられる。
- しかしながら，検討チームの議論を踏まえ，1質点系弾塑性モデルを用いて塑性応答の違いを検討したところ，乱數位相の模擬地震波の最大塑性率が佐藤・岡崎(2013)の手法による模擬地震波と比較して，周期0.3秒程度より短い周期帯では大きく，周期0.3秒程度より長い周期帯では同等である。【33～34頁】

■模擬地震波の選定

- 基準地震動として選定する模擬地震波は，「作成した模擬地震波の特徴」及び「位相特性の違いによる塑性応答への影響に関する分析」の検討を踏まえ，乱數位相の模擬地震波とする。
- なお，原子力発電所の耐震設計は，各種の不確かさを考慮した保守的な基準地震動を設定するとともに，重要な機器・配管系は基準地震動による地震力に対して塑性域に至る場合でもその量が微小なレベルに留まるよう設計するため，位相特性の差異（模擬地震波の差異）が伊方発電所の安全性に与える影響は小さいと考えられる。

-
1. 震源を特定せず策定する地震動に係る地震動評価の概要
 2. 震源を特定せず策定する地震動の策定及び基準地震動の策定
 3. 基準地震動Ss-3-3に適合する模擬地震波の作成
 - 3.1 正弦波の重ね合わせによる（乱數位相を用いた）模擬地震波の作成
 - 3.2 観測記録の位相を用いた模擬地震波の作成
 - 3.3 群遅延時間を考慮した模擬地震波の作成
 - 3.4 作成した模擬地震波の諸特性（周波数特性，継続時間，位相特性等）の分析
 - 3.5 基準地震動として策定する模擬地震波の選定
 4. まとめ

4. まとめ

まとめ

○震源を特定せず策定する地震動評価について、改正後の設置許可基準規則※1第4条に適合していることを確認した。



設置許可基準規則の解釈（別記2） 関連改正箇所

第4条5項の三

上記の「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定すること。なお、上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により策定すること。

②上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。

- ・2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動

- ・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

③上記の「地域性を考慮する地震動」の検討の結果、この地震動を策定する場合にあっては、事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震について、震源近傍における観測記録を用いること。

④解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的变化等の特性を適切に考慮すること。

※1 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(解釈含む)

4. まとめ

基準地震動Ssの最大加速度振幅

基準地震動Ss				最大加速度振幅(cm/s ²)		
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動	応答スペクトルに基づく手法	設計用模擬地震波		水平動	Ss-1H	650
				鉛直動	Ss-1V	377
	断層モデルを用いた手法	敷地前面海域の断層群(中央構造線断層帯)	480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・西破壊	水平動NS	Ss-2-1NS	579
				水平動EW	Ss-2-1EW	390
				鉛直動UD	Ss-2-1UD	210
			480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・中央破壊	水平動NS	Ss-2-2NS	456
				水平動EW	Ss-2-2EW	478
				鉛直動UD	Ss-2-2UD	195
			480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・第1アスペリティ西破壊	水平動NS	Ss-2-3NS	371
				水平動EW	Ss-2-3EW	418
				鉛直動UD	Ss-2-3UD	263
			480km連動・F&Mの手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・西破壊	水平動NS	Ss-2-4NS	452
				水平動EW	Ss-2-4EW	494
				鉛直動UD	Ss-2-4UD	280
			480km連動・F&Mの手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・中央破壊	水平動NS	Ss-2-5NS	452
				水平動EW	Ss-2-5EW	388
				鉛直動UD	Ss-2-5UD	199
			480km連動・F&Mの手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・東破壊	水平動NS	Ss-2-6NS	291
				水平動EW	Ss-2-6EW	360
				鉛直動UD	Ss-2-6UD	201
54km・入倉・三宅の手法・ $\Delta\sigma$ 1.5倍・中央破壊	水平動NS	Ss-2-7NS	458			
	水平動EW	Ss-2-7EW	371			
	鉛直動UD	Ss-2-7UD	178			
480km連動・壇の手法・ $\Delta\sigma$ 20MPa・中央破壊・入れ替え	水平動NS	Ss-2-8NS	478			
	水平動EW	Ss-2-8EW	456			
	鉛直動UD	Ss-2-8UD	195			
震源を特定せず策定する地震動	2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動		水平動	Ss-3-1H	620	
			鉛直動	Ss-3-1V	320	
	2000年鳥取県西部地震賀祥ダムの観測記録		水平動NS	Ss-3-2NS	528	
			水平動EW	Ss-3-2EW	531	
	標準応答スペクトル		鉛直動UD	Ss-3-2UD	485	
			水平動	Ss-3-3H	600	
		鉛直動	Ss-3-3V	400		