

川内原子力発電所1号炉、2号炉審査資料

資料番号

TTS-056

提出年月日

2023年11月1日

川内原子力発電所 1号炉及び2号炉

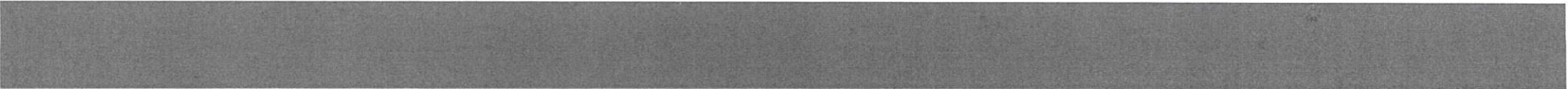
標準応答スペクトルを考慮した地震動評価について

2023年11月1日

九州電力株式会社

目次

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ	P. 2
2. 地下構造モデルの設定	P. 8
2.1 地下構造モデルの設定	P. 9
2.2 地下構造モデルの適用性確認	P. 13
3. 模擬地震波の作成	P. 26
3.1 模擬地震波の作成方針	P. 27
3.2 乱数位相を用いた模擬地震波の作成	P. 29
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成	P. 32
3.4 解放基盤表面の地震波の比較	P. 40
4. 基準地震動の策定	P. 46
5. 超過確率の参照	P. 52
6. まとめ	P. 55
【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果	P. 59
【補足②】 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. 65
【参考①】 速度構造の見直しに係る経緯について	P. 70
【参考②】 応答スペクトルの比較結果	P. 79
【参考③】 既許可の地下構造モデル	P. 100
【参考④】 ボーリング孔内Q値に関する知見	P. 110
【参考⑤】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について	P. 116
【参考⑥】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について	P. 126
【参考⑦】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認	P. 132



1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 改正基準の概要

- ・ 「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（別記2）」の改正（令和3年4月21日原子力規制委員会決定）の概要を以下に示す。

(別記2)

第4条第5項第三号

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付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。

- ① 上記の「震源を特定せず策定する地震動」の策定に当たっては、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を考慮する地震動」の2種類を検討対象とすること。
- 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

つづく

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

つづき

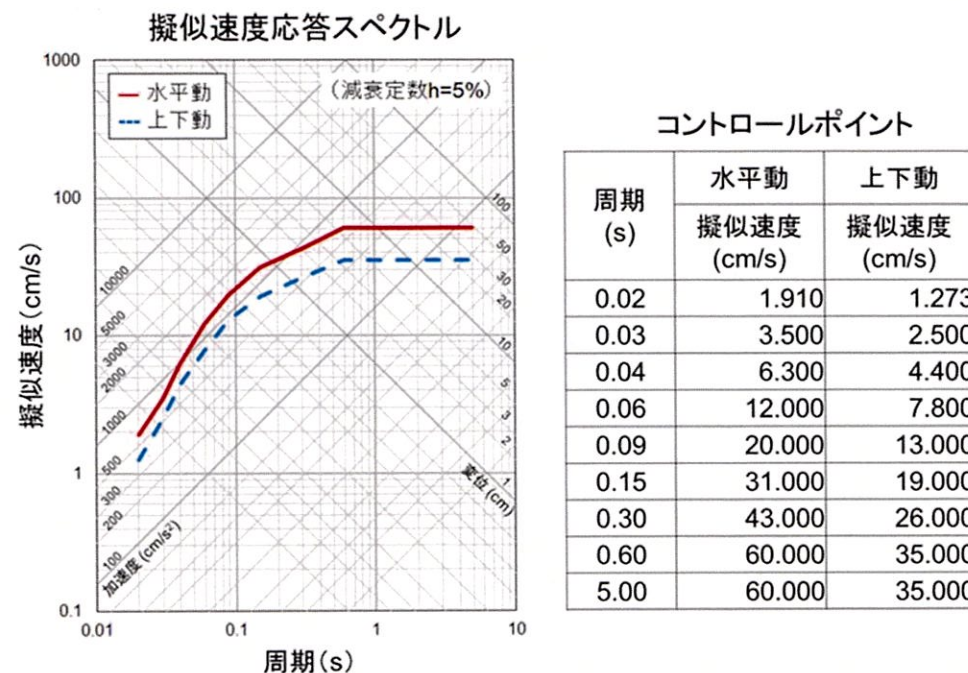
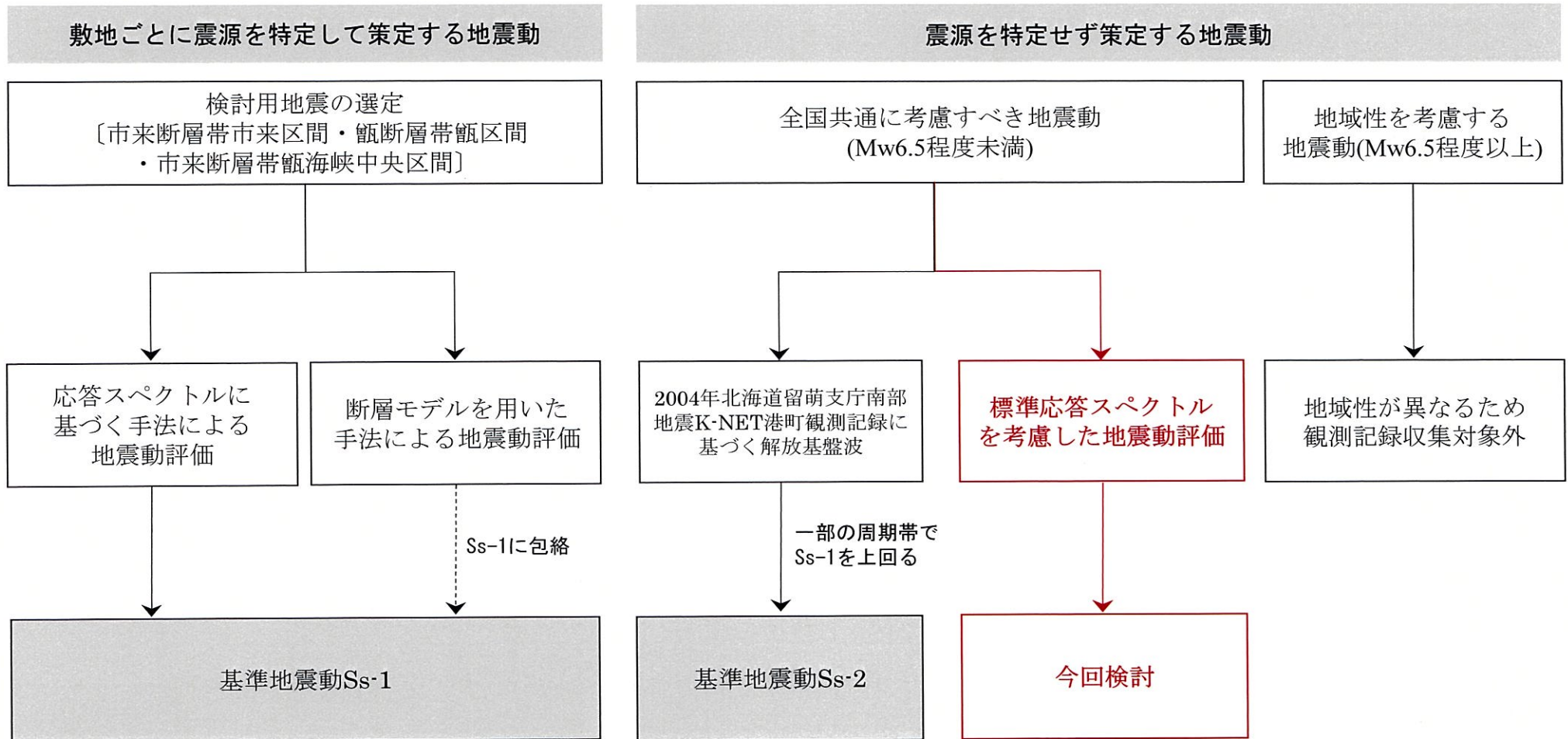


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- 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変化等の特性を適切に考慮すること。
- ⑤ 上記の「震源を特定せず策定する地震動」について策定された基準地震動の妥当性については、最新の科学的・技術的知見を踏まえて個別に確認すること。

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 基準地震動の策定フロー



※1 Mw6.5程度未満の地震については、基準・ガイドの改正における2004年北海道留萌支庁南部地震・標準応答スペクトルの考慮及び収集対象となる14地震の例示の削除を踏まえて評価を実施。
標準応答スペクトルは加藤ほか(2004)による応答スペクトルを上回ることから、既許可において既往の知見として考慮していた加藤ほか(2004)は「震源を特定せず策定する地震動」の検討対象から除外する。

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 現行の基準地震動（平成29年2月8日許可）の最大加速度

(単位：cm/s²)

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	今回検討		

1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

- ・以下の流れで、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し、現行の基準地震動Ss-1の応答スペクトルとの比較を実施し、基準地震動を策定。

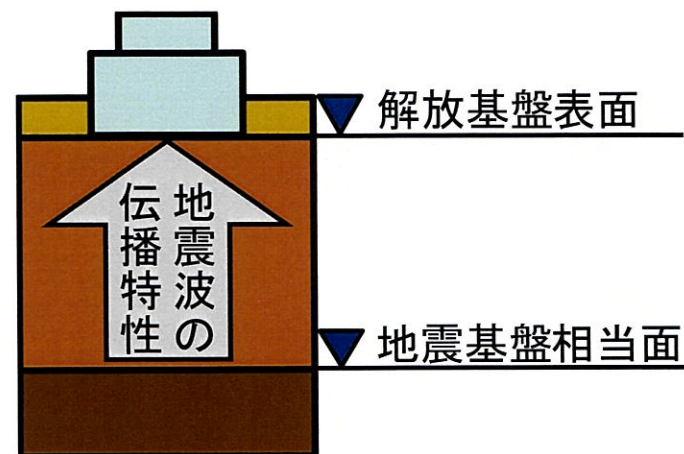
① 地下構造モデルの設定（2章）

② 模擬地震波の作成（3章）

③ 基準地震動の策定（4章）

④ 超過確率の参照（5章）

標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価の流れ



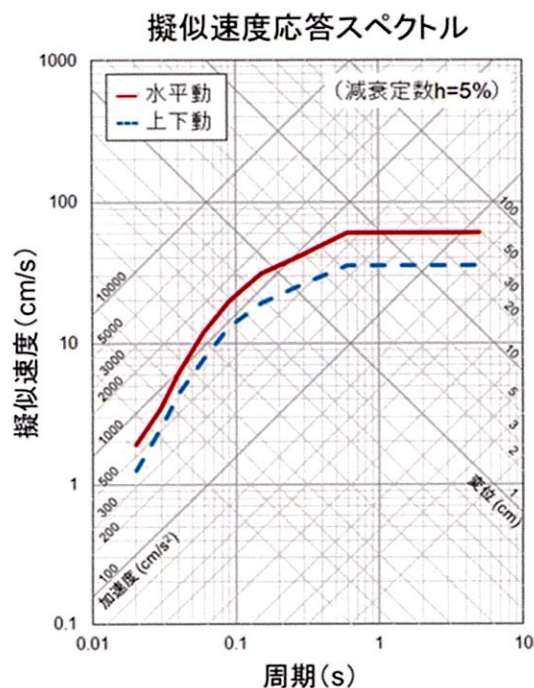
標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価のイメージ

2. 地下構造モデルの設定

2.1 地下構造モデルの設定

■ 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

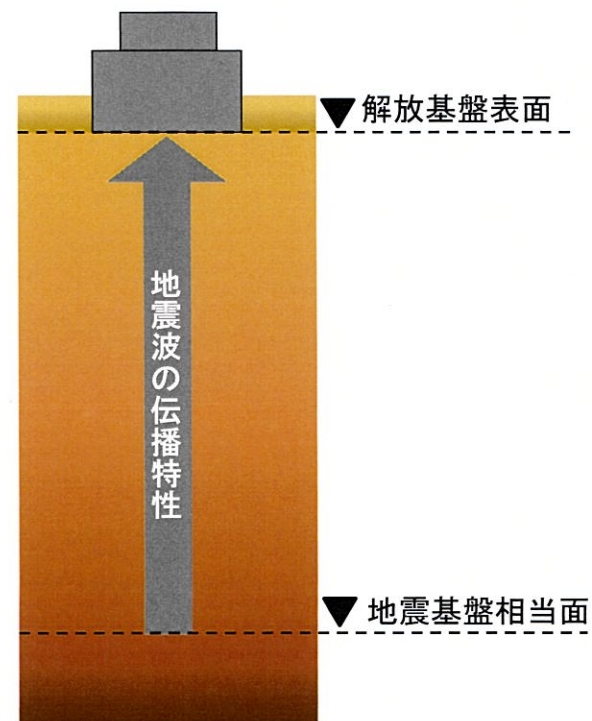
- 標準応答スペクトルは、周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されることを踏まえ、全ての周期帯に適用できる地下構造モデルを設定することが必要となる。
- また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されるため、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルを設定する。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価には、既許可モデル※を用いる。（参考①、②）
※長周期帯における理論的手法による評価に用いる解放基盤表面以深の地下構造モデル（平成29年2月8日許可）
- さらに、川内原子力発電所の地震基盤相当面については、設置許可基準規則の解釈（別記2）の記載を踏まえ、標準応答スペクトル用モデルにおける $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層上面に設定。



地震基盤相当面における標準応答スペクトル

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



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

2.1 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定 (1/2)

- 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は、既許可モデルを用いる。
 - 既許可の地下構造モデルは、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、理論的手法による長周期帯の地震動評価に用いていた。
 - 今回、既許可モデルは、長周期帯に限定したものではないことを確認し、短周期から長周期までの全ての周期帯の地震動評価に用いる。
 - 》 試掘坑内弾性波試験、鉛直アレイ観測、微動アレイ観測、宮腰ほか(2004)¹⁾及び地震調査委員会(2003)²⁾の文献等の設定根拠は短周期から長周期までに適用できる手法に基づき設定されている。(参考③)
 - 》 文献で設定されている範囲については、地下構造モデルに反映が必要な新知見が既許可以降得られていないことを確認。
- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面 ($V_s=2200\text{m/s}$ 以上の層) で定義されることから、既許可モデルの $V_s=3010\text{m/s}$ の層上面 (EL. -1018.5m) に地震基盤相当面を設定する。
- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録 (12頁) (応答スペクトル) に照らしても、長周期帯だけでなく、短周期帯についても適用できることを確認する。

地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q 値	
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	▼解放基盤表面
-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	

2.1 地下構造モデルの設定

■ 地下構造モデルの設定 (2/2)

- 設定根拠は下表のとおり。(参考③)

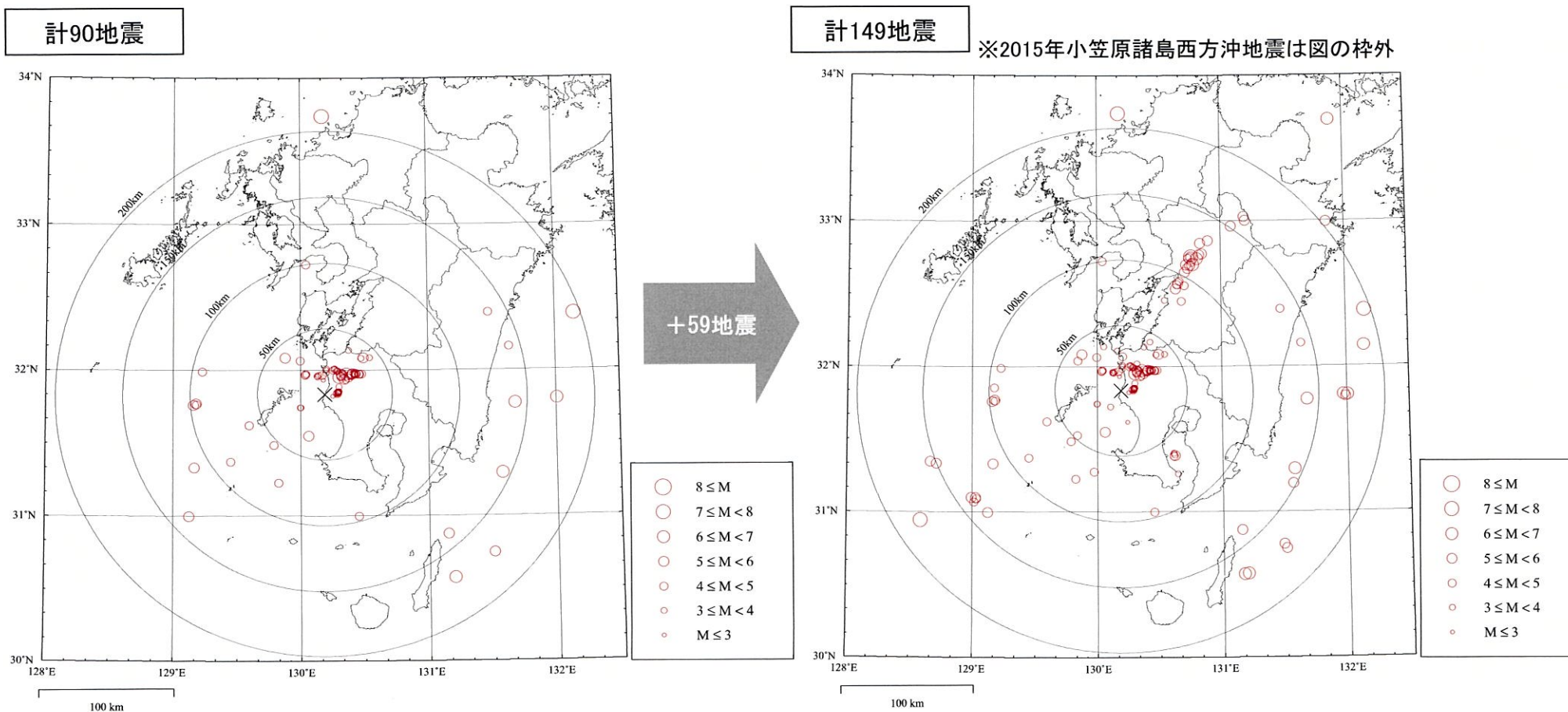
既許可モデルの設定根拠

	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q 値
解放基盤表面 EL. -18.5m								
EL. -28.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	岩石試験 結果を基 に設定	試掘坑内 弾性波試験	慣用値 (Vs/15~ Vs/10)
EL. -480m	-0.01	2.70	1600	3700	100		鉛直アレイ及び微動 アレイの速度構造を 基に設定	
地震基盤相当面 EL. -1018.5m	-0.462	2.70	2150	4400	200		微動アレイの 速度構造を基に設定	
EL. -2018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200		宮腰ほか(2004)	
EL. -3018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300			
EL. -17018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300	地震調査委員会(2003)		
EL. -33018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500			
	-33.0	3.30	4300	7600	500			

2.1 地下構造モデルの設定

■ 敷地内の鉛直アレイ地震観測記録

- 既許可時審査以降、川内原子力発電所の敷地地盤における鉛直アレイによる地震観測を継続して実施しており、新たに、2016年熊本地震を含む59地震の観測記録を取得。（計149地震の観測記録）



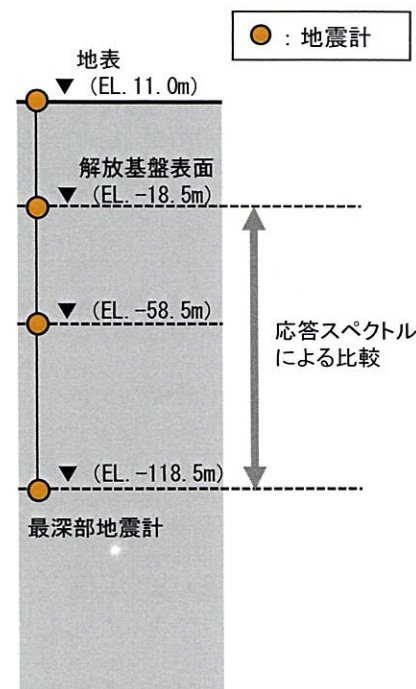
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

2.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 既許可モデルの適用性確認

- 既許可以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録（応答スペクトル）に照らしても、長周期帯だけでなく、短周期帯についても保守性の観点から適用できることを以下の方法により確認した。
- 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認（14～25頁）
 - － 解放基盤表面（EL. -18.5m）からEL. -118.5mの範囲について、既許可モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
 - － 短周期側では大きな保守性を有する傾向がみられる。
- なお、EL. -18.5mからEL. -118.5mの範囲における応答スペクトルの比較では、水平方向の一部の地震観測記録において、周期0.1～0.2秒付近で既許可モデルによる応答波が局所的に観測記録を僅かに下回る。
- 一方、EL. -118.5mからEL. -200mの範囲のボーリング孔内減衰測定結果との比較において、既許可モデルの地盤減衰（Q値）は大きな保守性を有している。（補足①）
- 以上より、EL. -18.5mからEL. -118.5mの範囲において、周期0.1～0.2秒付近で観測記録を僅かに下回るが、EL. -118.5mからEL. -200mの範囲で地盤減衰（Q値）が大きな保守性を有しており、保守性の観点から既許可モデルの適用に問題はない。



2.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認

- 既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計20地震※を用いて応答スペクトルによる適用性の確認を実施する。

※ Noda et al. (2002)³⁾の適用範囲を参考にM5.4以上、震央距離200km以内の内陸地殻内地震を選定

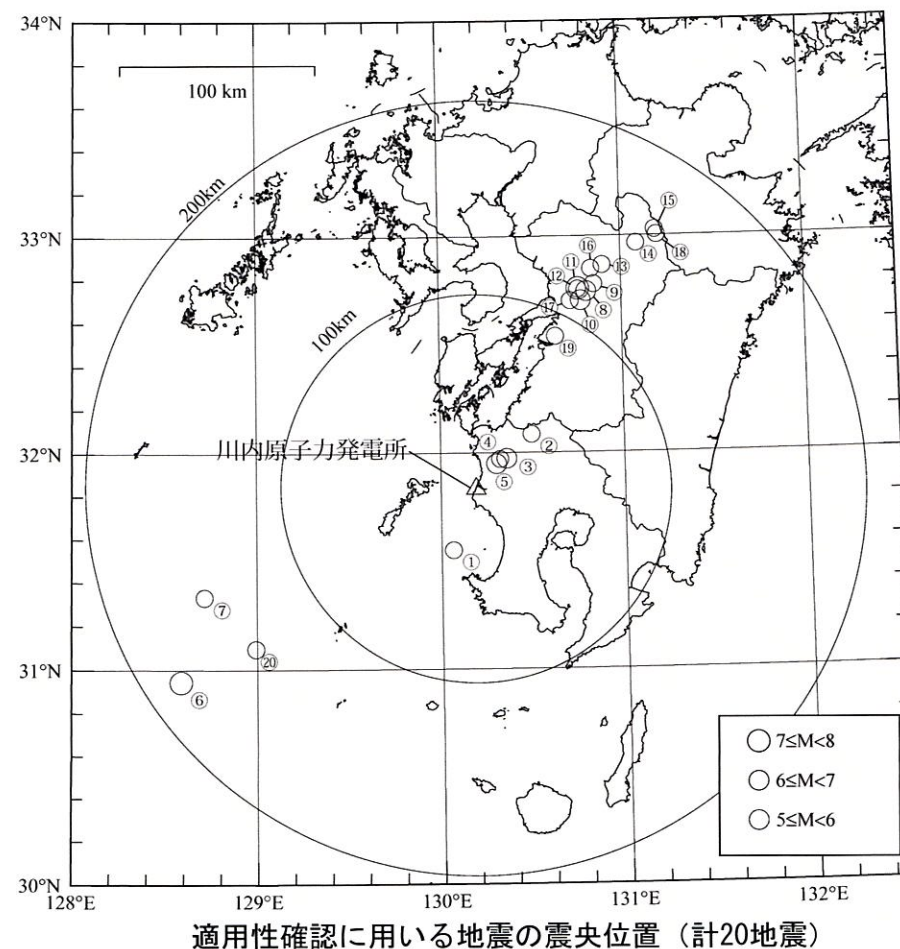
適用性確認に用いる地震諸元 (計20地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34	24
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40	25
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22	23
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20	21
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17	23
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181	25
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151	25
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116	25
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122	25
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111	25
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116	25
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115	25
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132	25
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151	25
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162	25
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑰	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑱	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88	25
⑳	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140	25

既許可時審査



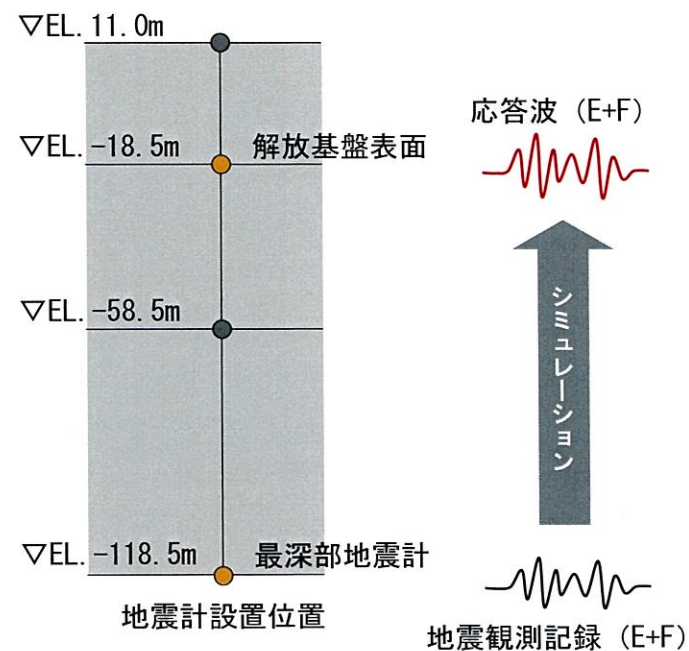
今回新たに追加



2.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 地震観測記録の応答スペクトルによる適用性の確認結果

- 最深部地震計 (EL. -118.5m) で得られた地震観測記録を入力※とし、1次元波動論に基づき、推定した応答波 (EL. -18.5m) ※の応答スペクトルと同位置の地震計で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施し、以下の点を確認した。(16~25頁)
 - 応答波の応答スペクトルが、短周期から長周期までの全ての周期帯において、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回る。
 - 短周期側では大きな保守性を有する傾向がみられる。

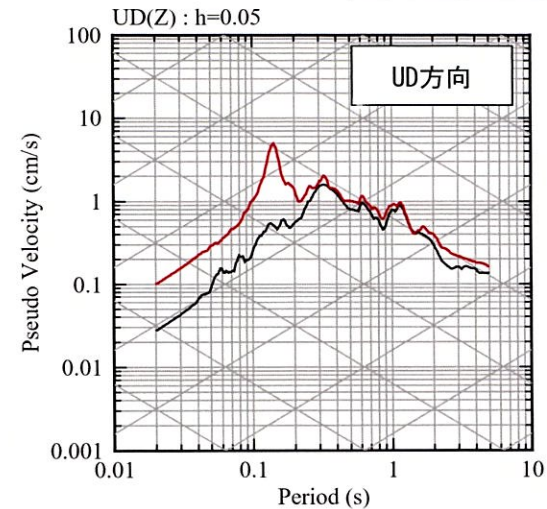
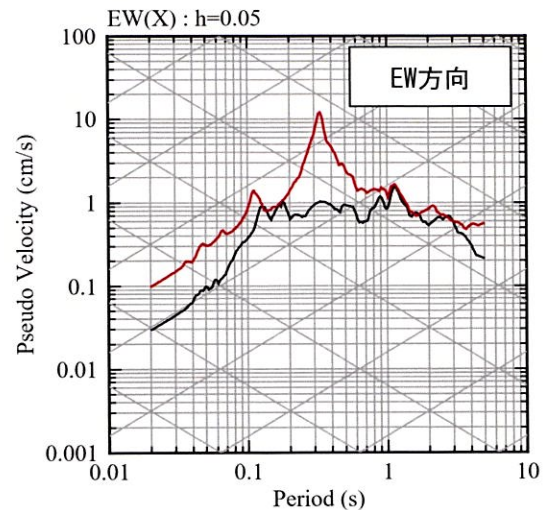
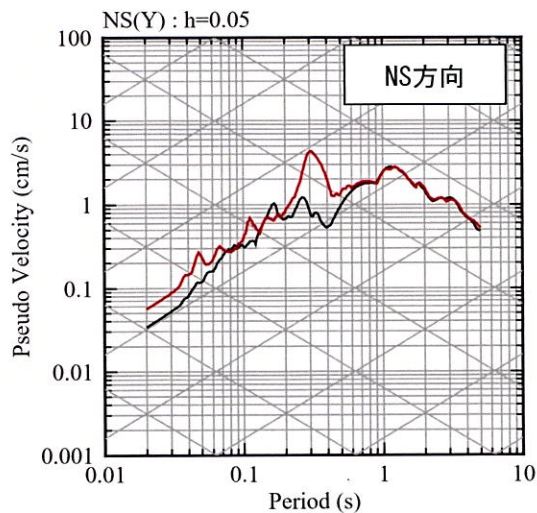


※入力の最深部地震計 (EL.-118.5m) で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤表面 (EL.-18.5m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価

2.2 地下構造モデルの適用性確認

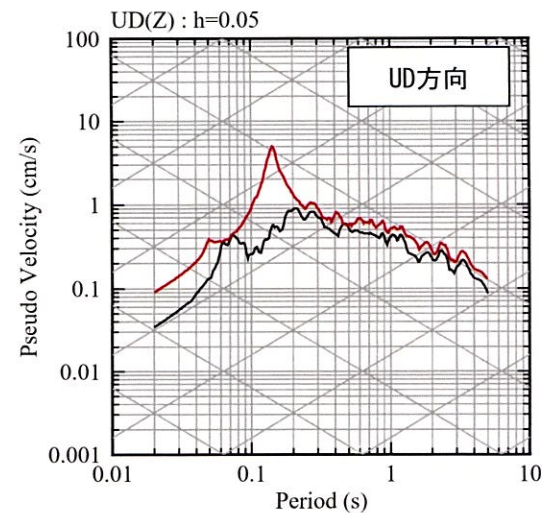
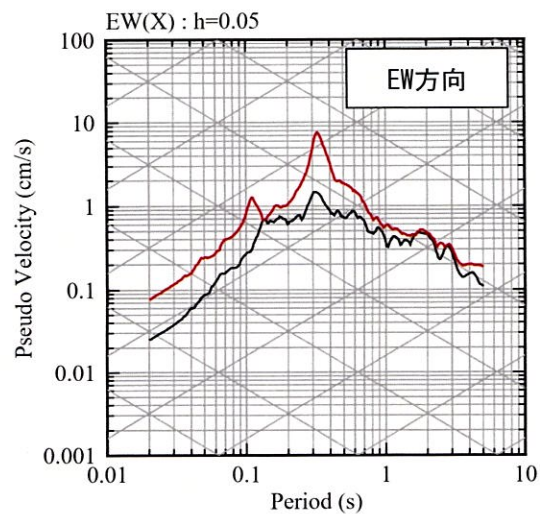
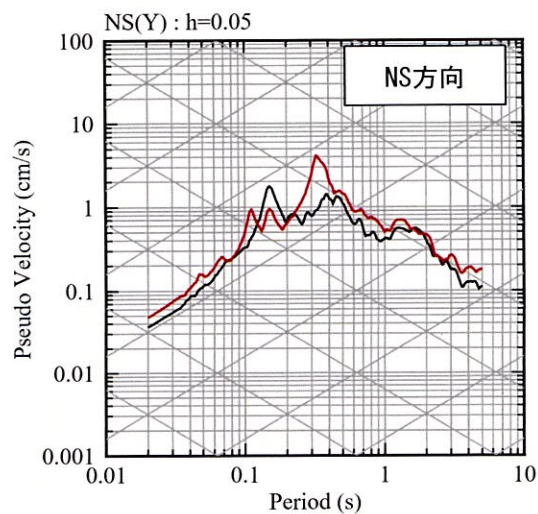
■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

①九州西側海域



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

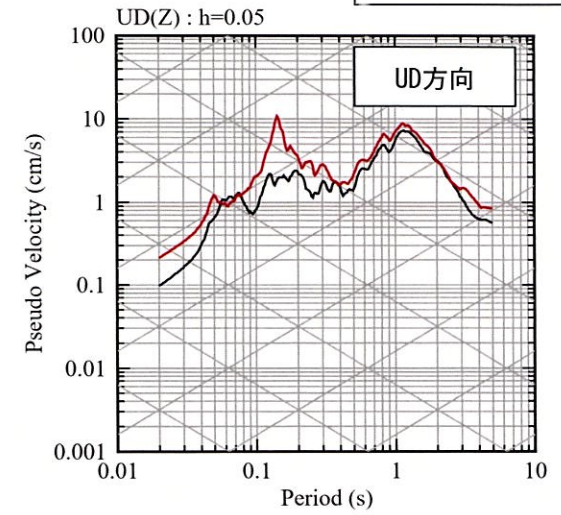
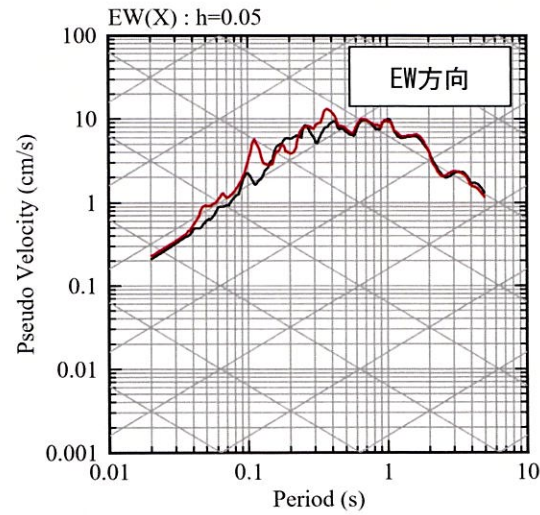
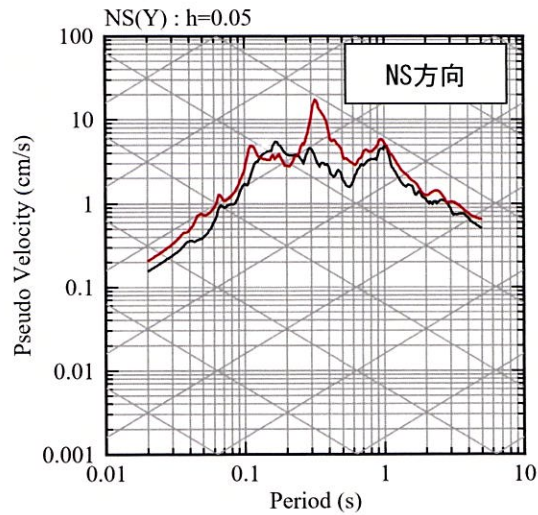
②鹿児島県北西部



2.2 地下構造モデルの適用性確認

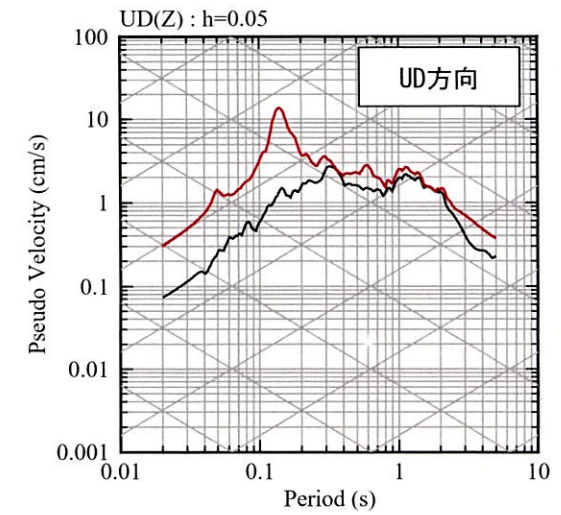
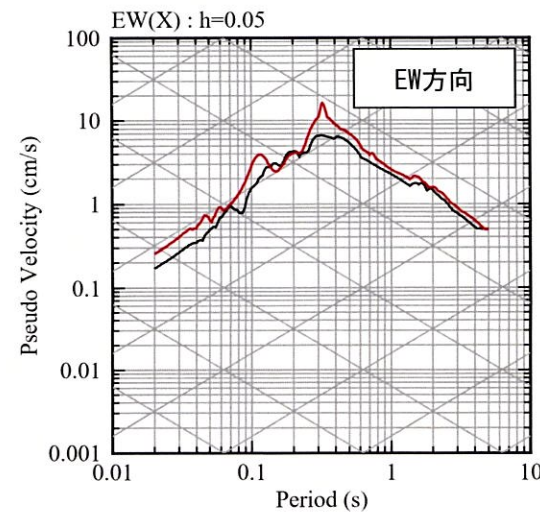
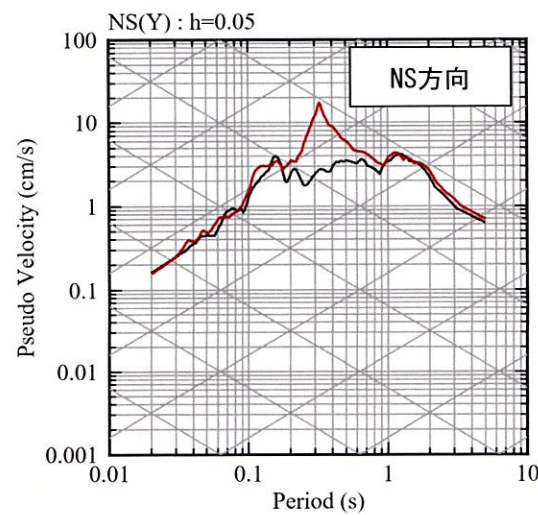
■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

③ 鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

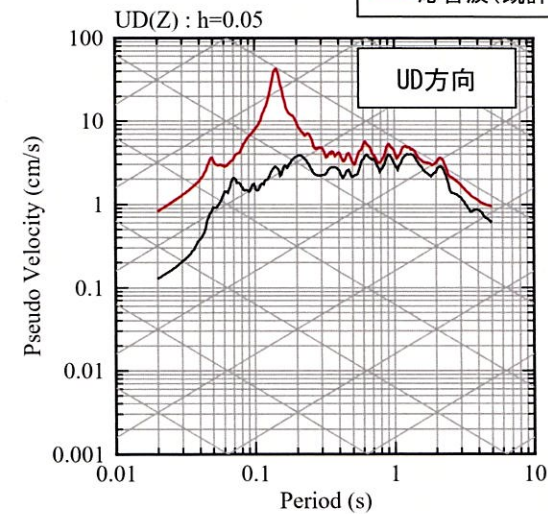
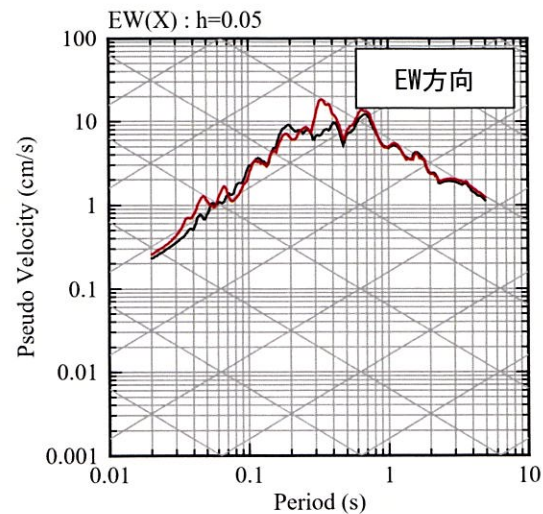
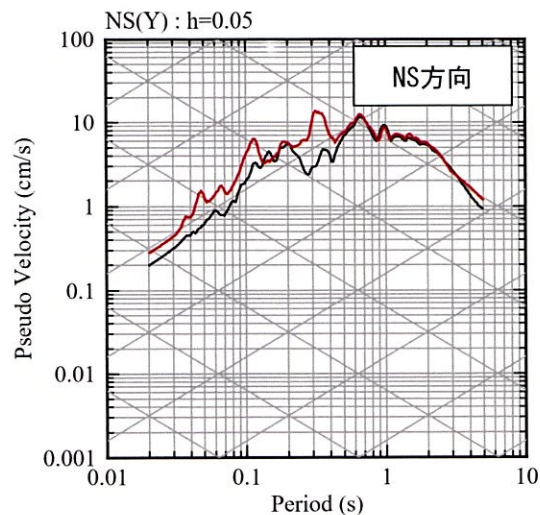
④ 鹿児島県北西部



2.2 地下構造モデルの適用性確認

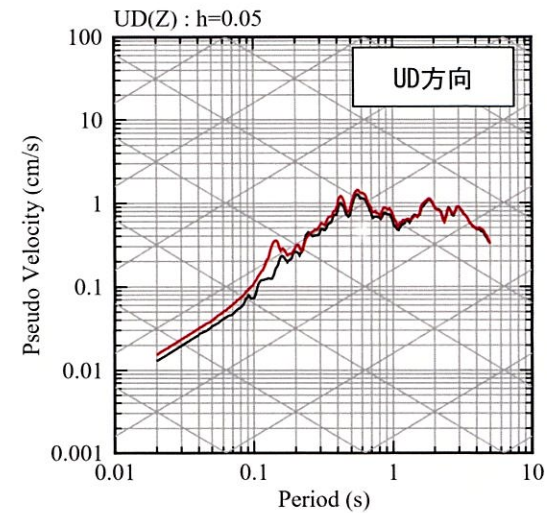
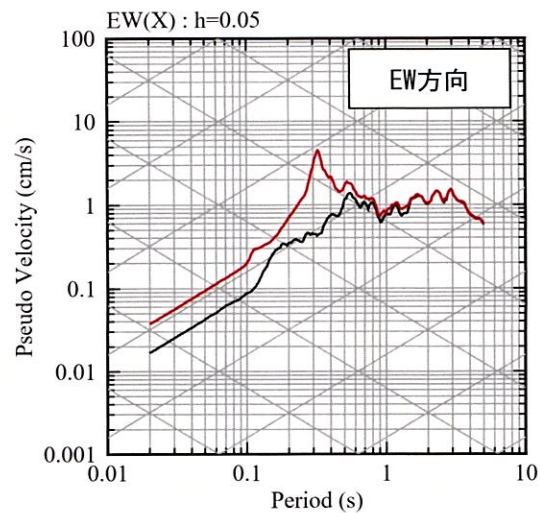
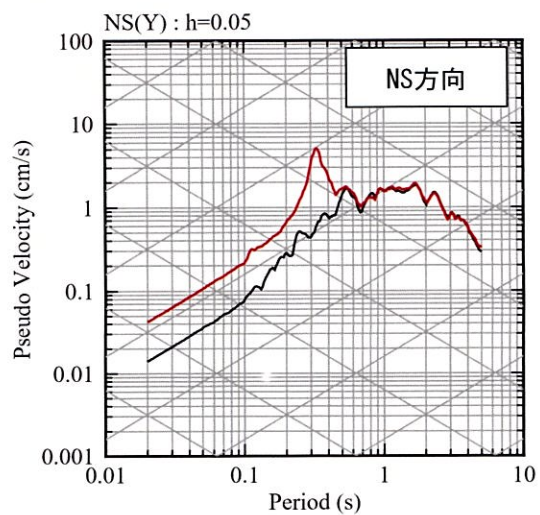
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

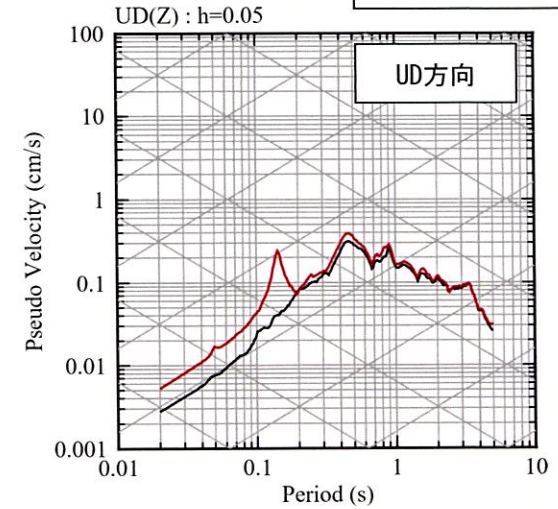
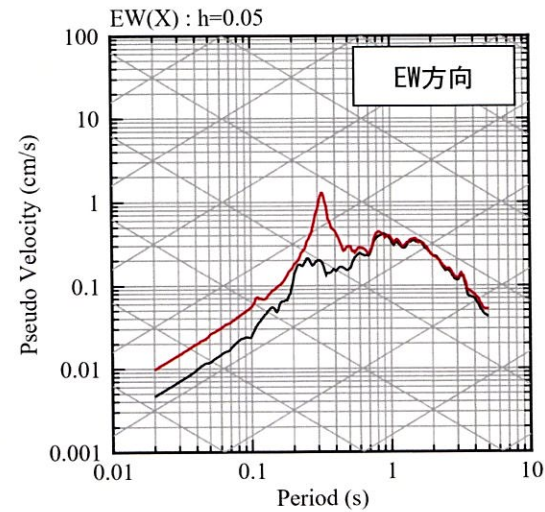
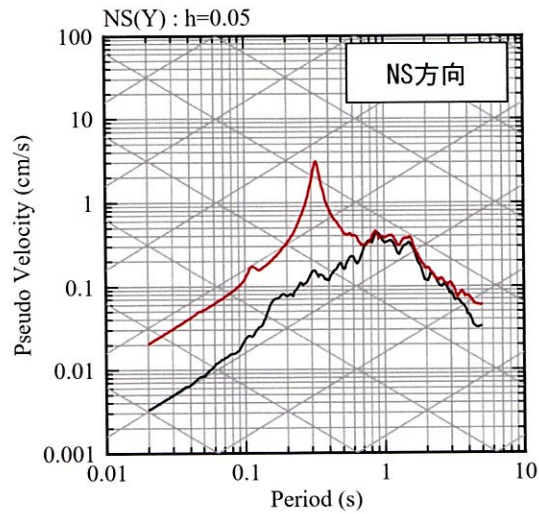
⑥ 薩摩半島西方沖



2.2 地下構造モデルの適用性確認

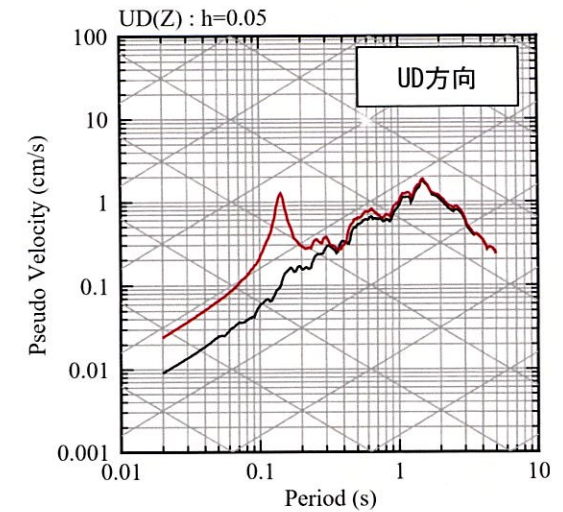
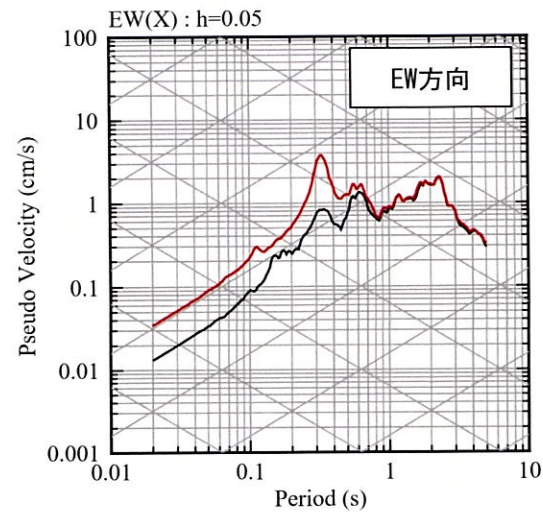
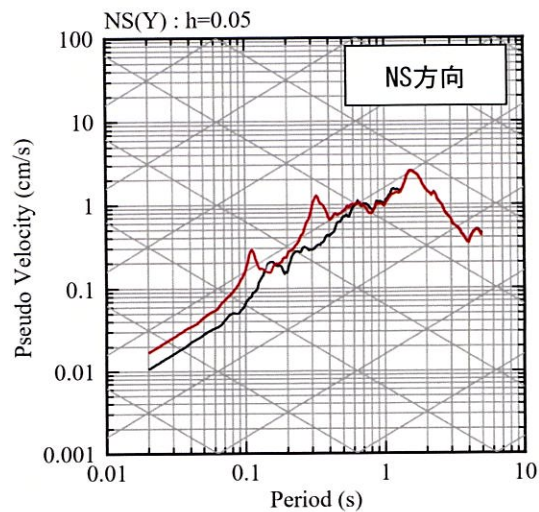
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦ 薩摩半島西方沖



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波 (既許可モデル)

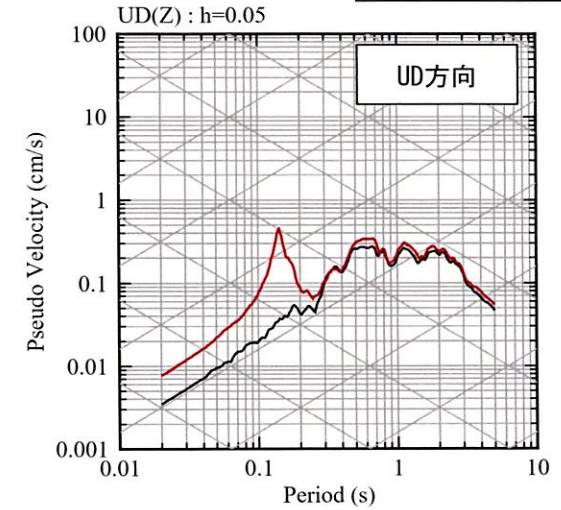
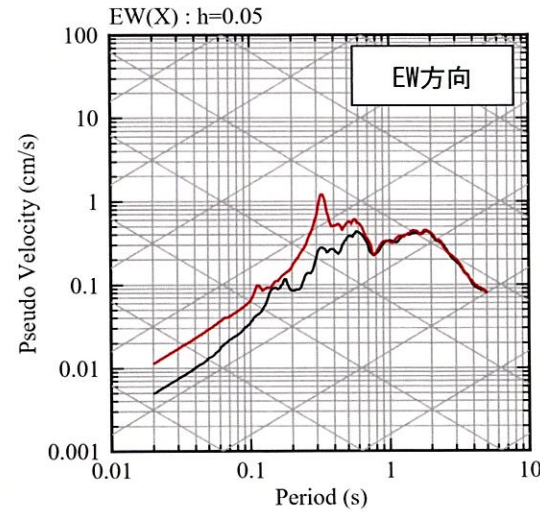
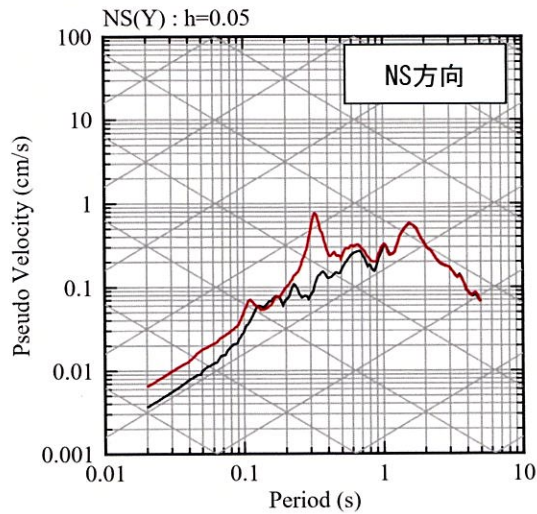
⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



2.2 地下構造モデルの適用性確認

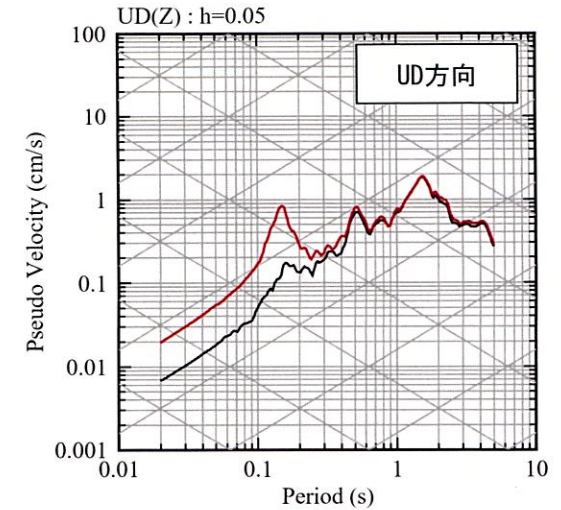
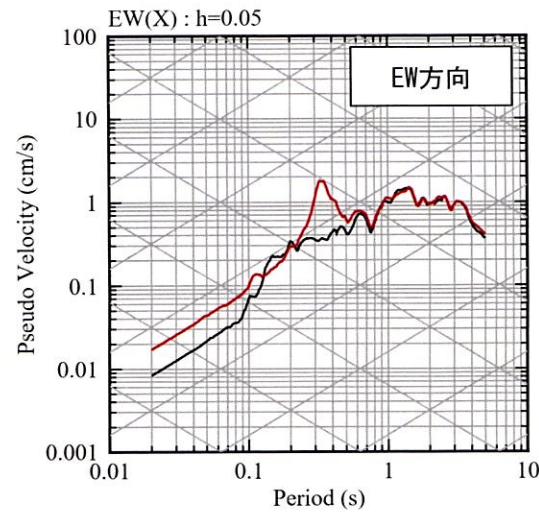
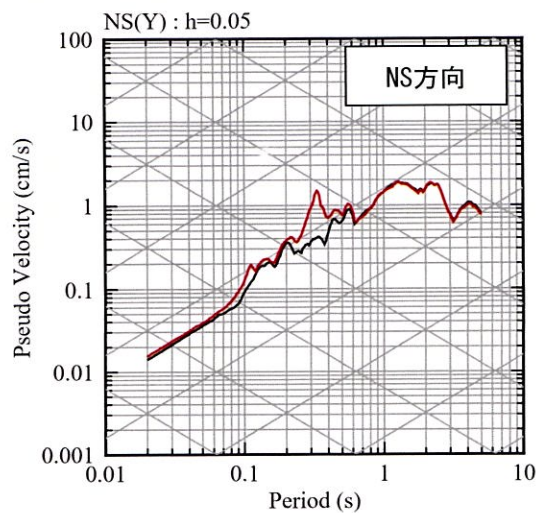
■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

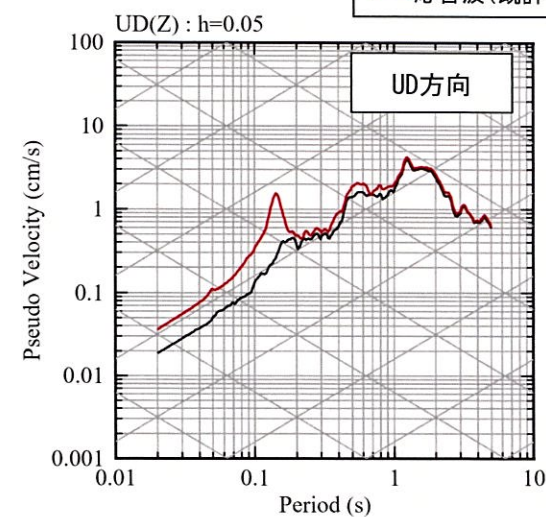
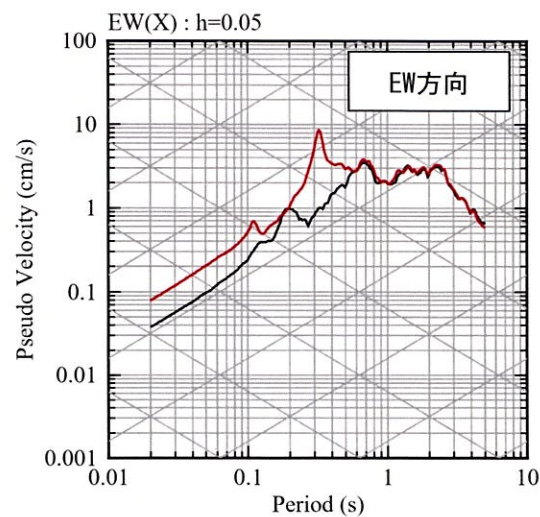
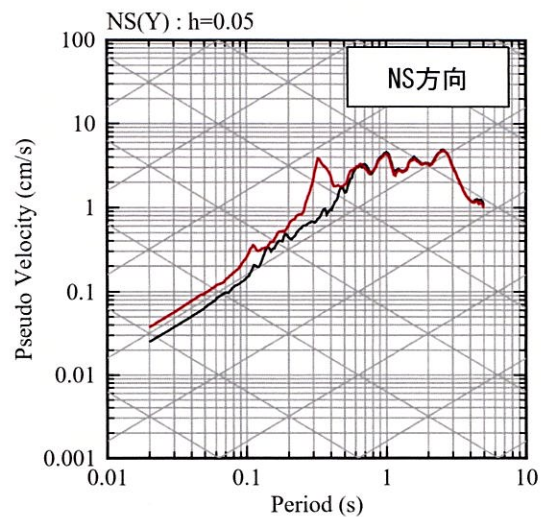
⑩ 熊本県熊本地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

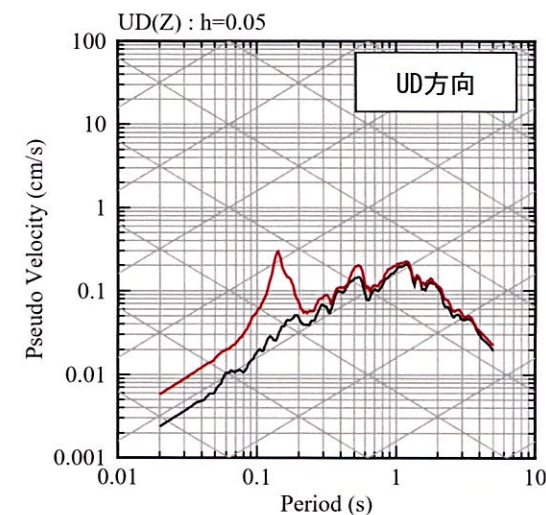
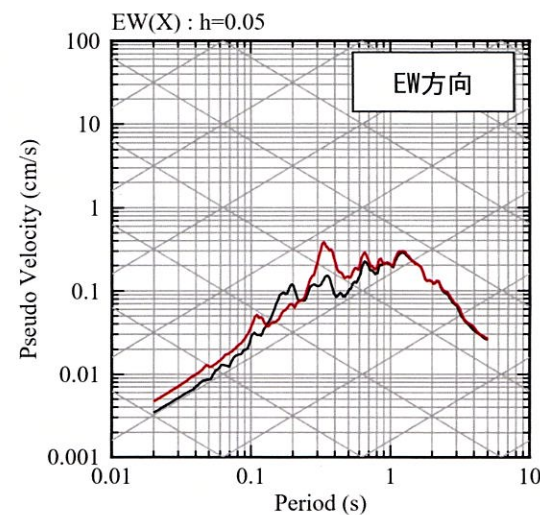
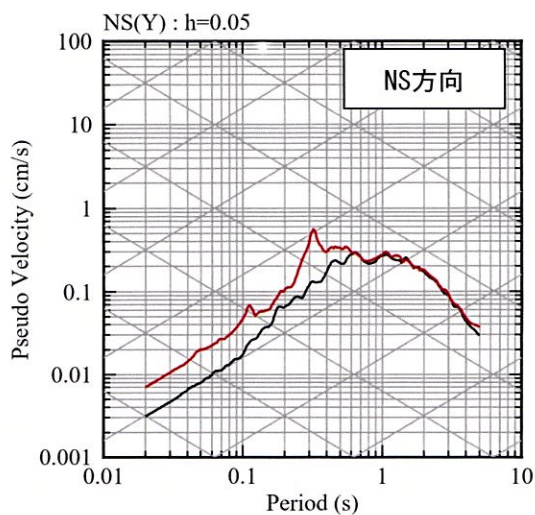
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

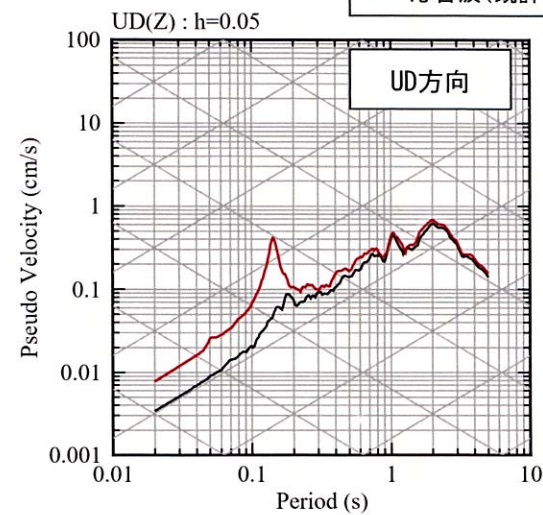
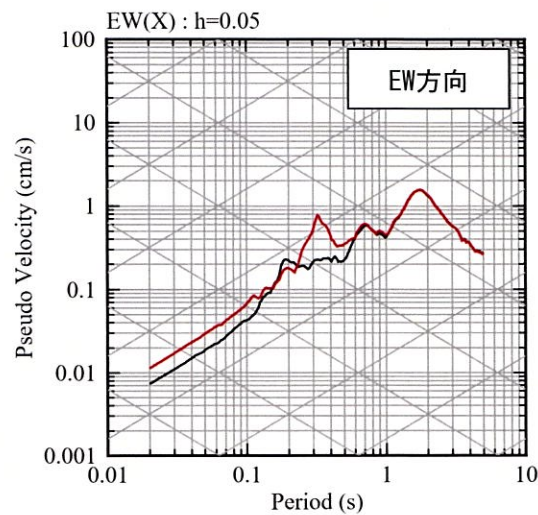
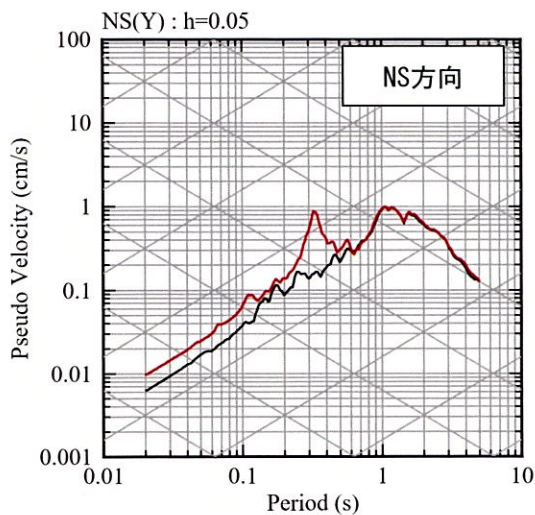
⑫ 熊本県熊本地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

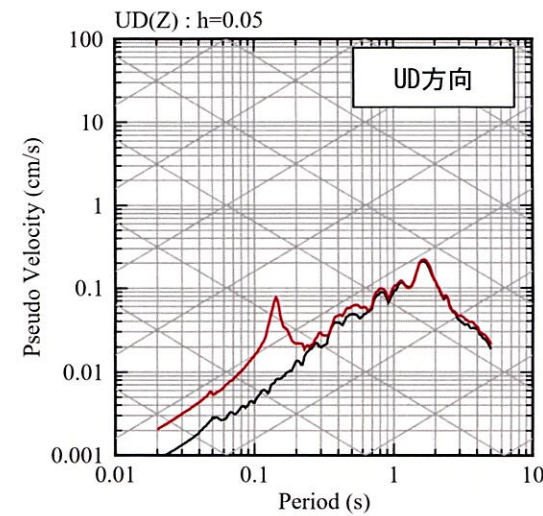
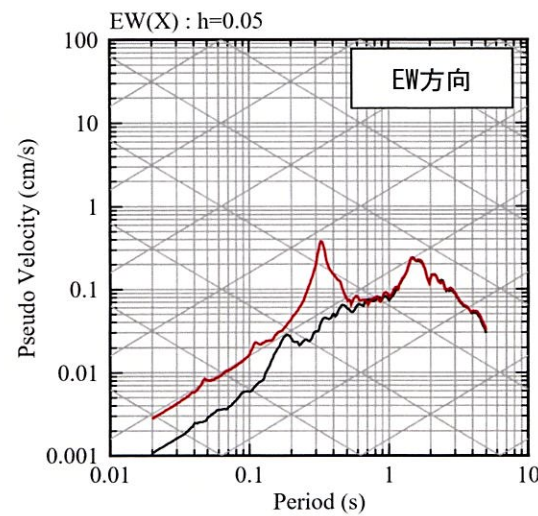
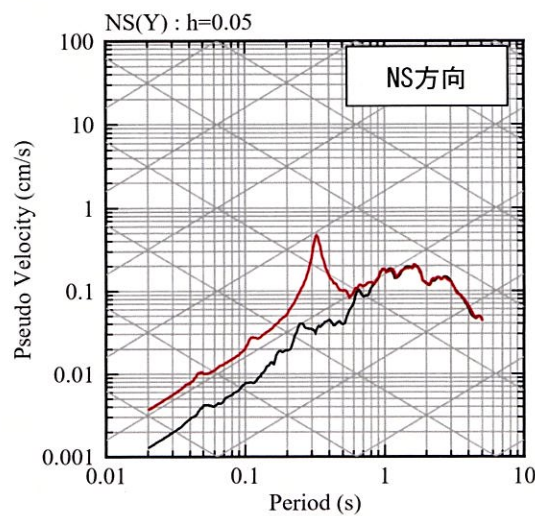
■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

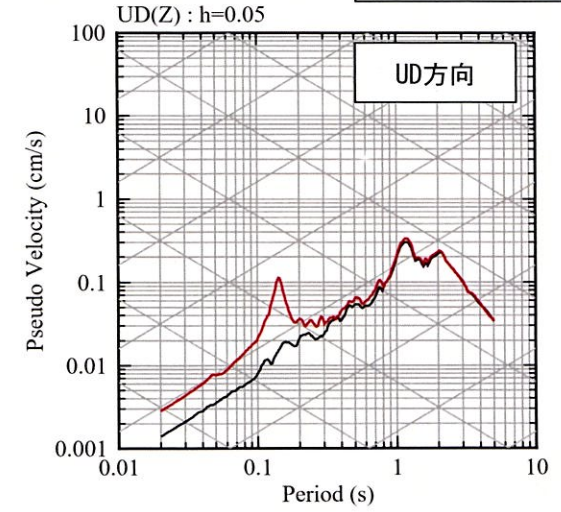
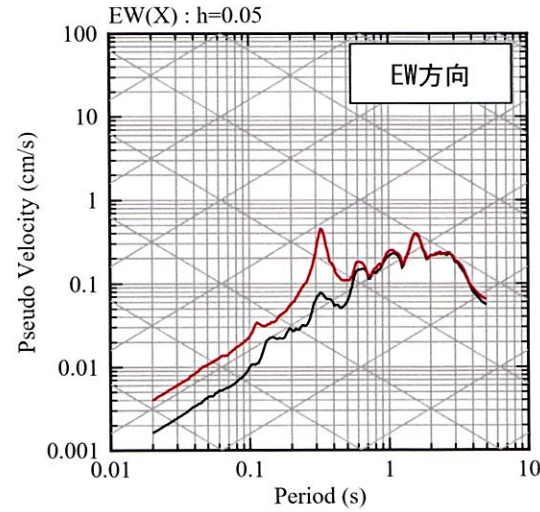
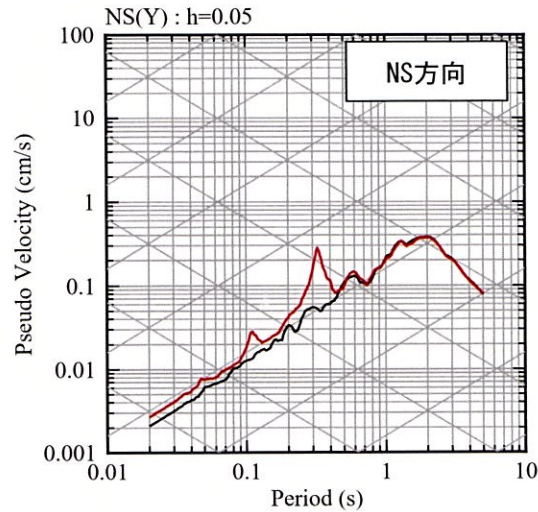
⑭ 熊本県阿蘇地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

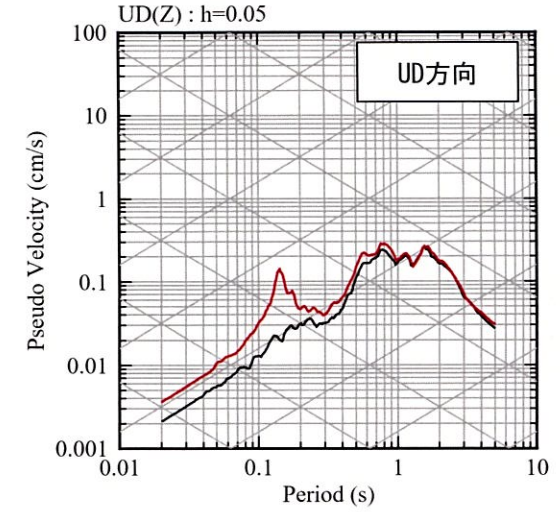
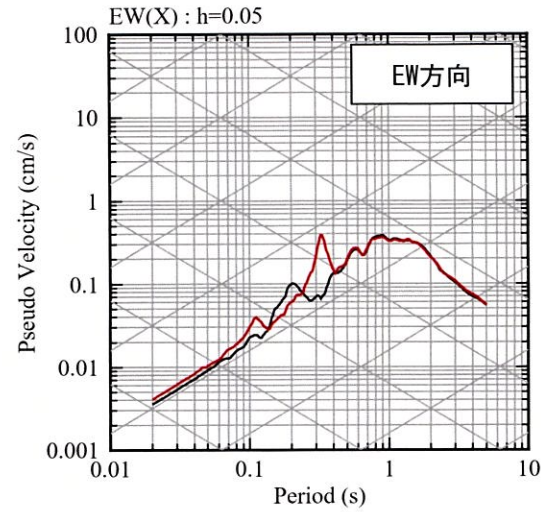
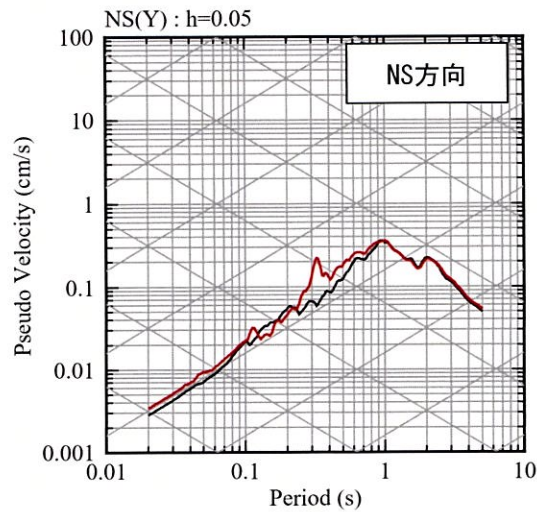
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

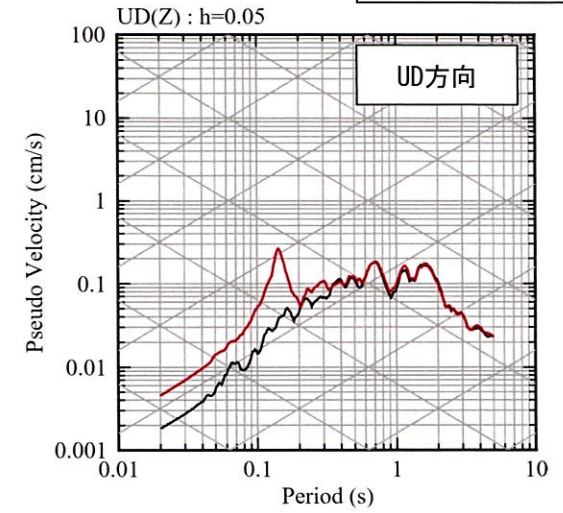
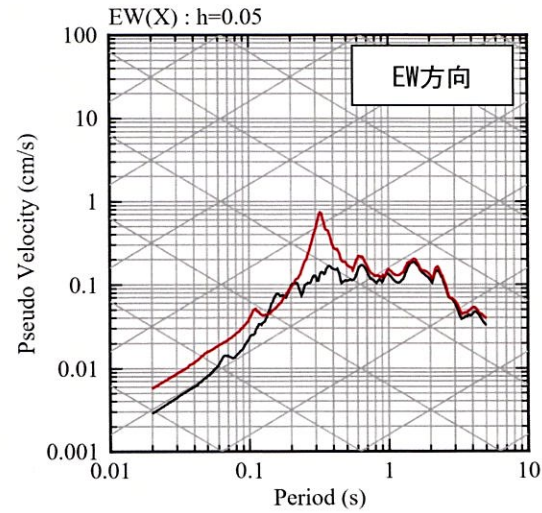
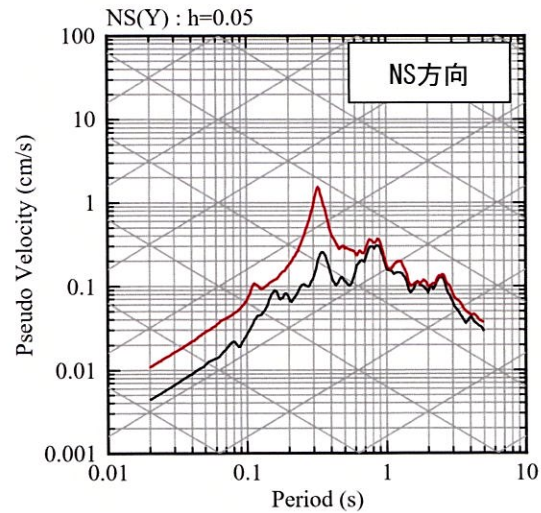
⑯ 熊本県熊本地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

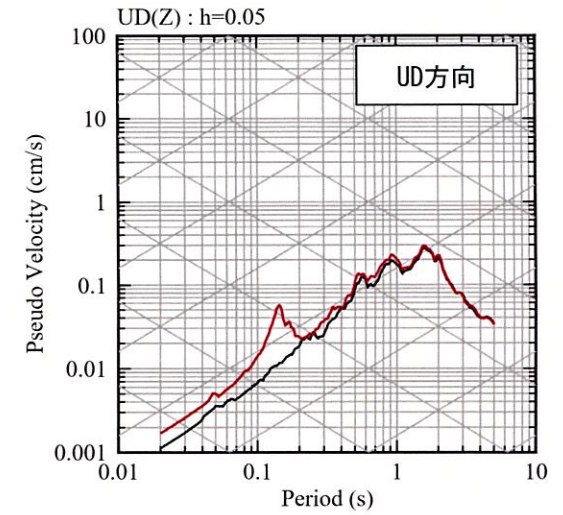
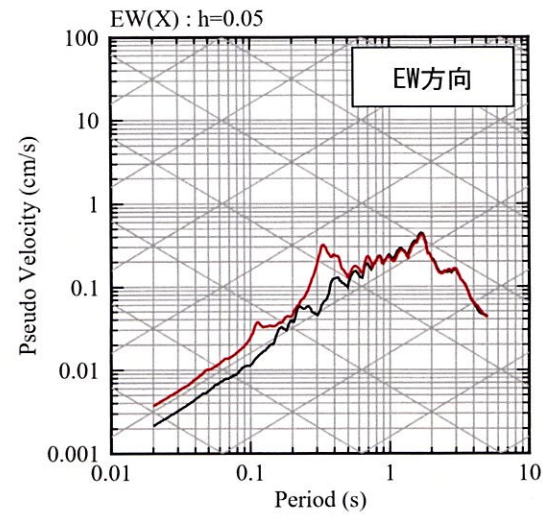
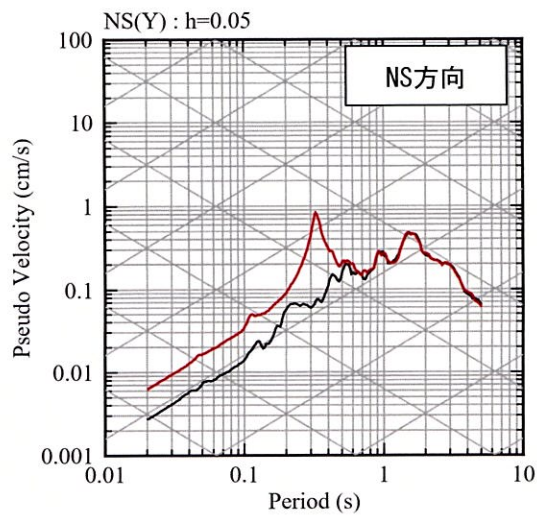
■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑰ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

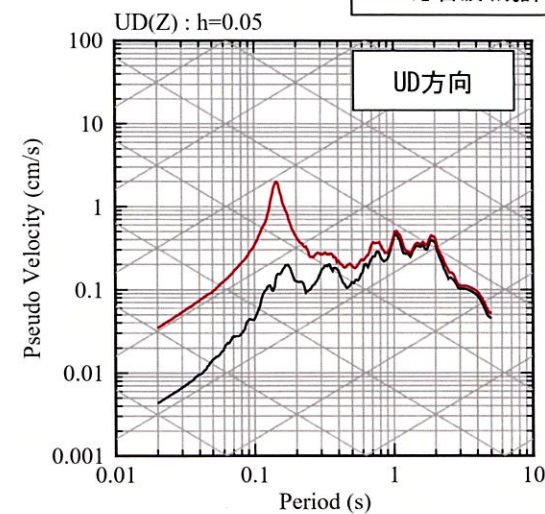
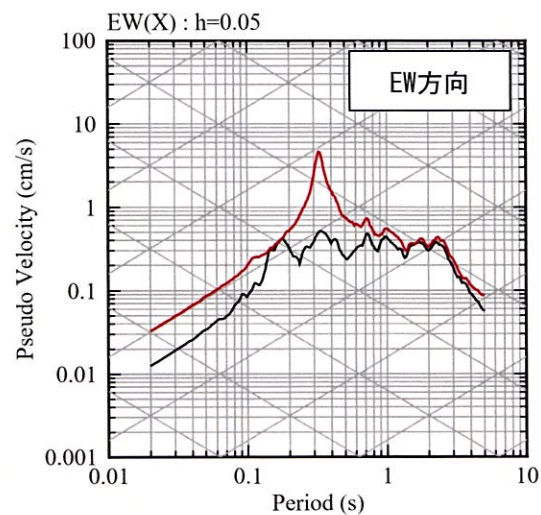
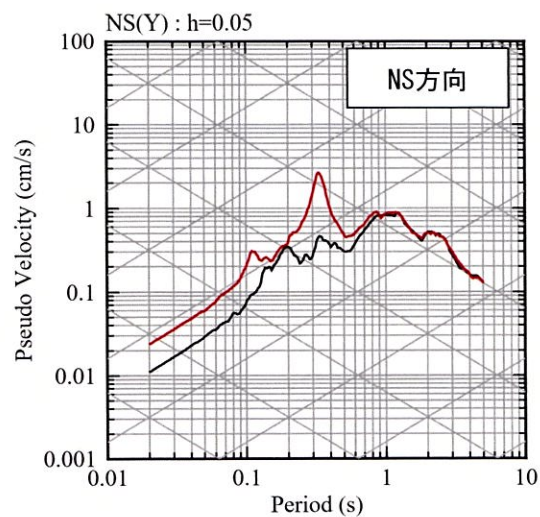
⑱ 熊本県阿蘇地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

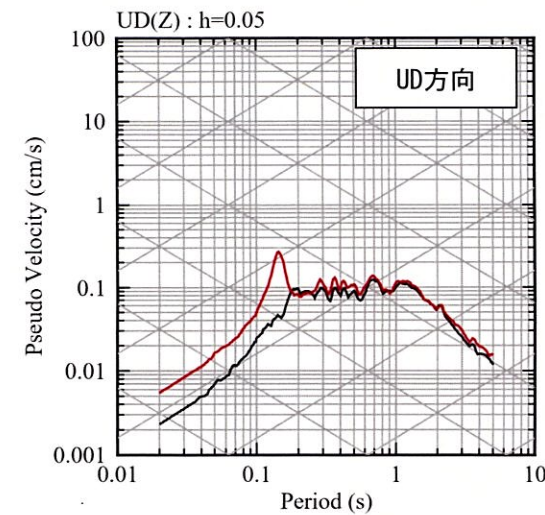
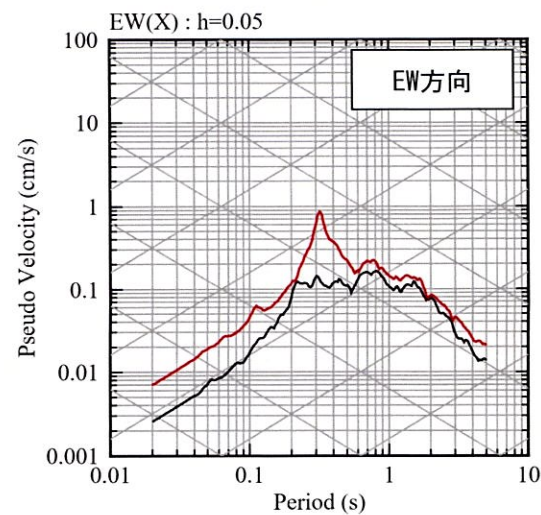
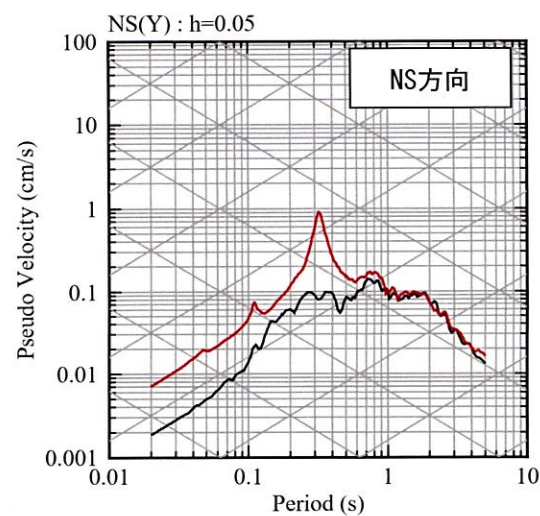
■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

⑱ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

⑳ 薩摩半島西方沖



3. 模擬地震波の作成

3.1 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。

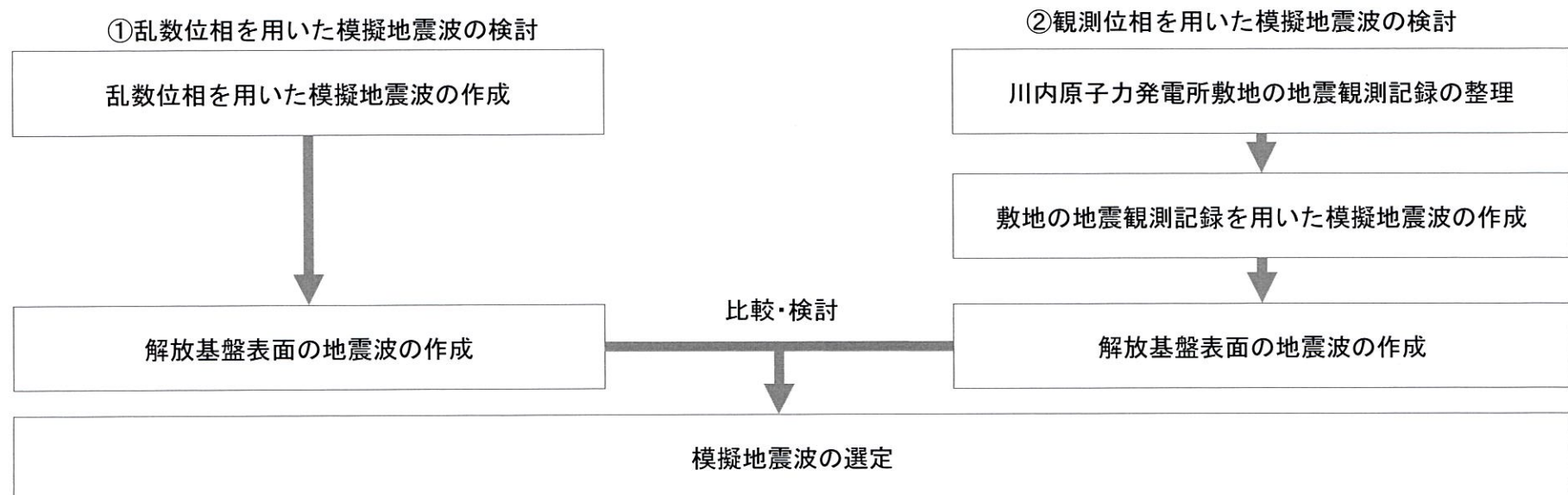
- 審査ガイドを踏まえて、以下の方針で模擬地震波を作成し、解放基盤表面における地震波を比較・検討した上で、「標準応答スペクトルを考慮した地震動」に用いる模擬地震波を設定する。

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)³⁾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。）

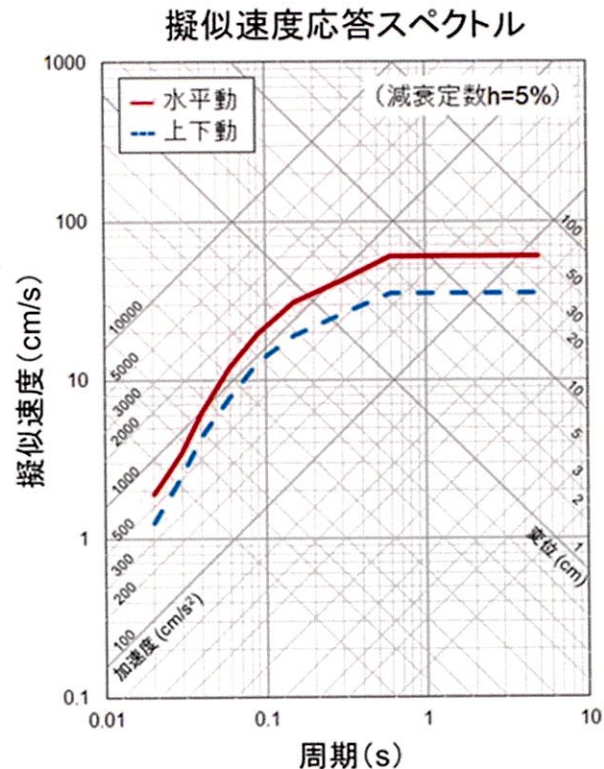
→川内原子力発電所敷地で得られた地震観測記録を整理し、実観測記録の位相を用いて模擬地震波を作成。



3.1 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)⁴⁾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 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値
解放基盤表面	-18.5m	0.0	1500	3200	100
	-28.5m	-0.01	1600	3700	100
	-480m	-0.462	2150	4400	200
地震基盤相当面	-1018.5m	-1.0	3010	5200	200
	-2018.5m	-2.0	3240	5600	300
	-3018.5m	-3.0	3500	5900	300
	-17018.5m	-17.0	3800	6600	500
	-33018.5m	-33.0	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)

3.2 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)³⁾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。

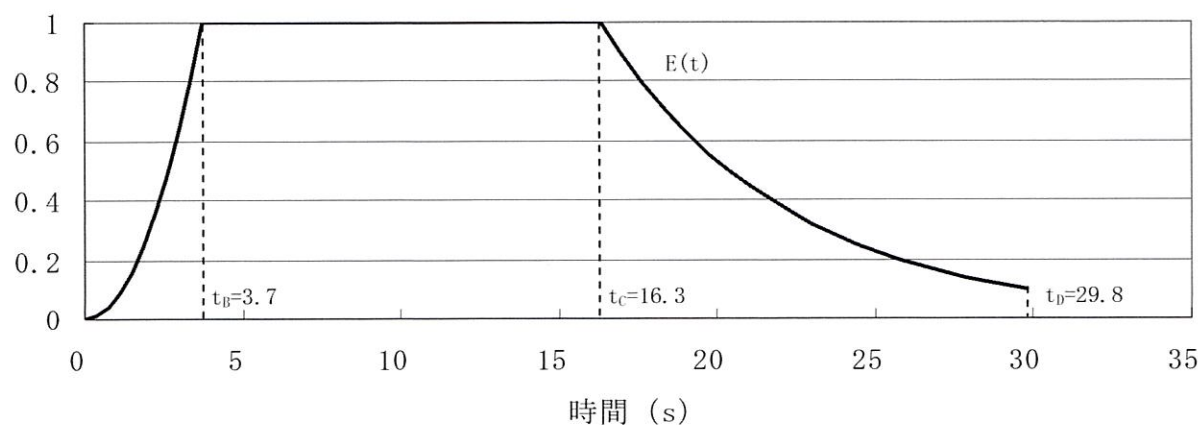
マグニチュード M:

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)⁵⁾の M_0 -M関係及びKanamori(1977)⁶⁾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



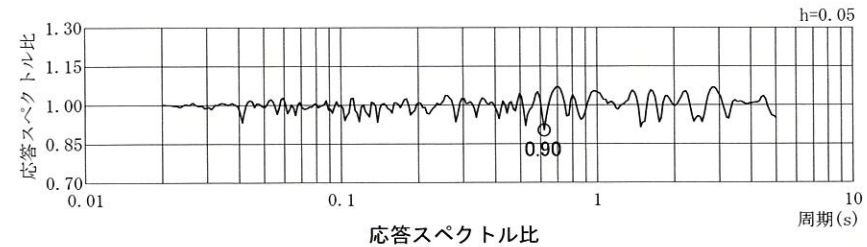
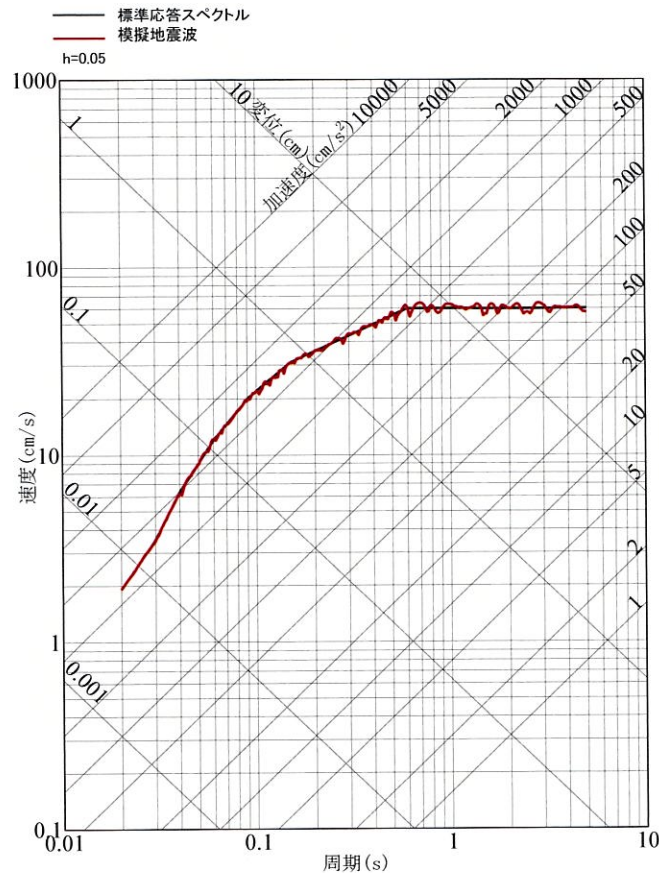
$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & (0 < t \leq t_B) \\ 1.0 & (t_B < t \leq t_C) \\ \frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C} (t - t_C) & (t_C < t \leq t_D) \end{cases}$$

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

3.2 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)⁴⁾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
② SI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

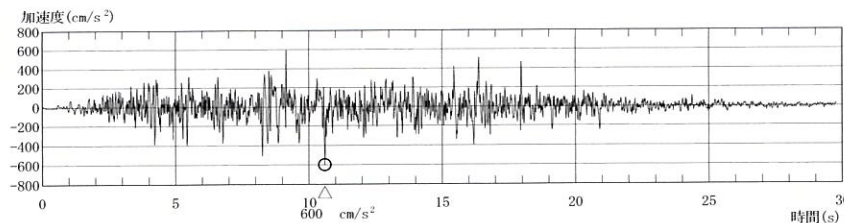
$$\textcircled{2} \quad \text{SI比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

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)

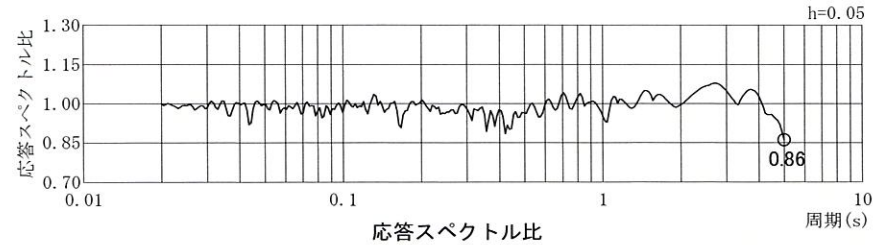
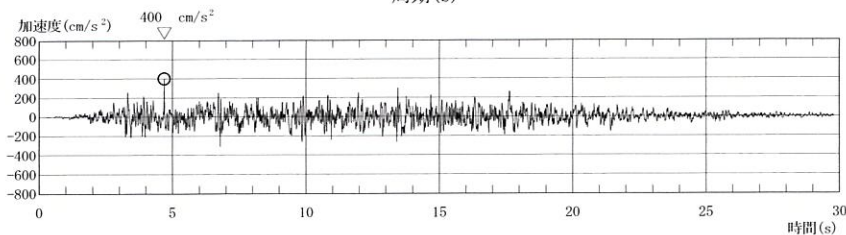
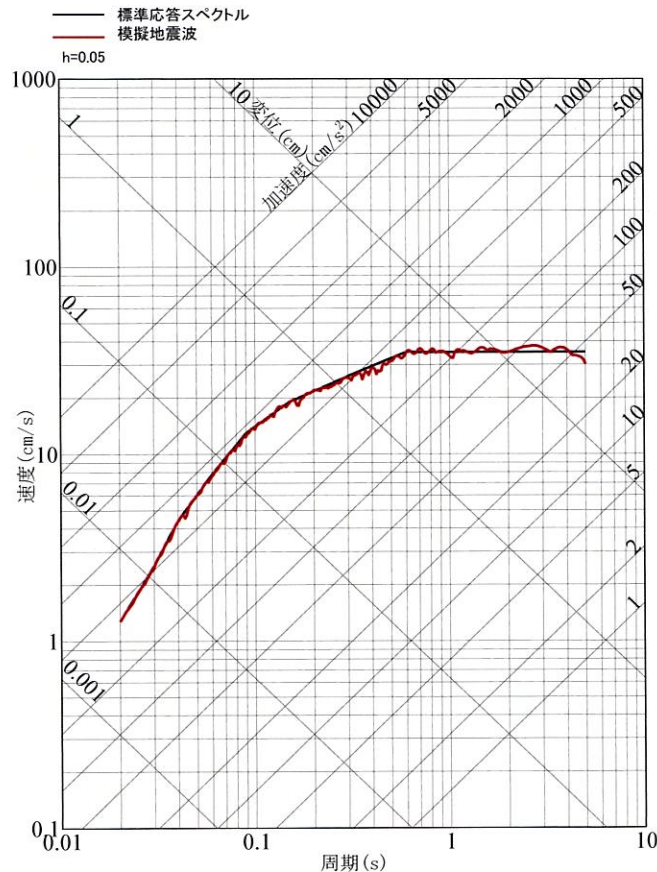
T : 固有周期 (s)



3.2 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)⁴)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)

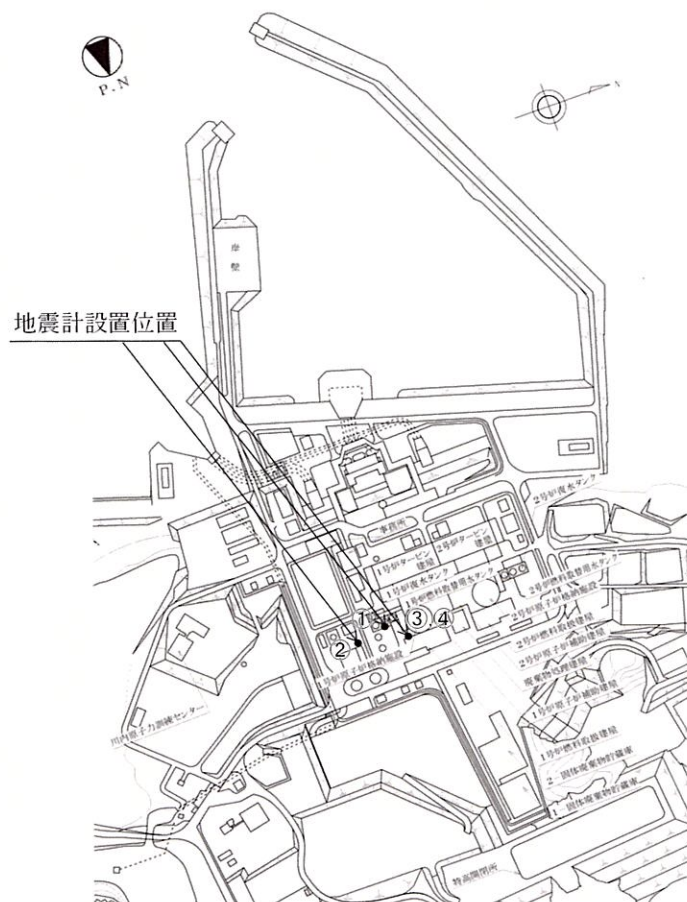
$\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

T : 固有周期 (s)

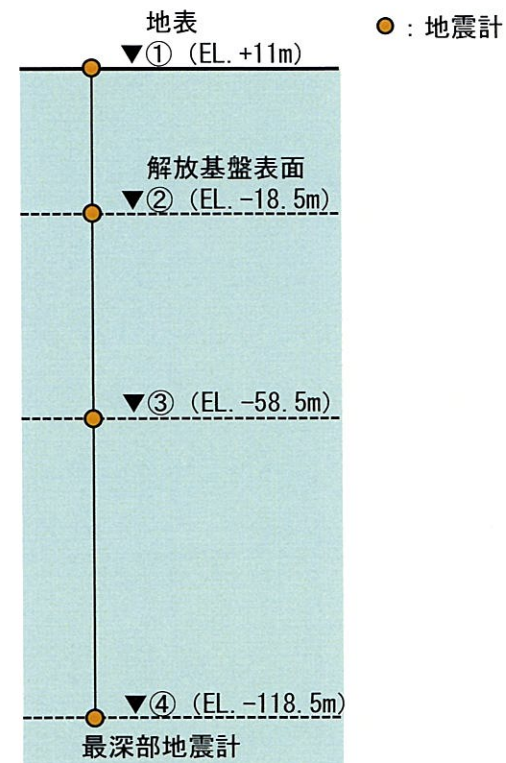
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 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

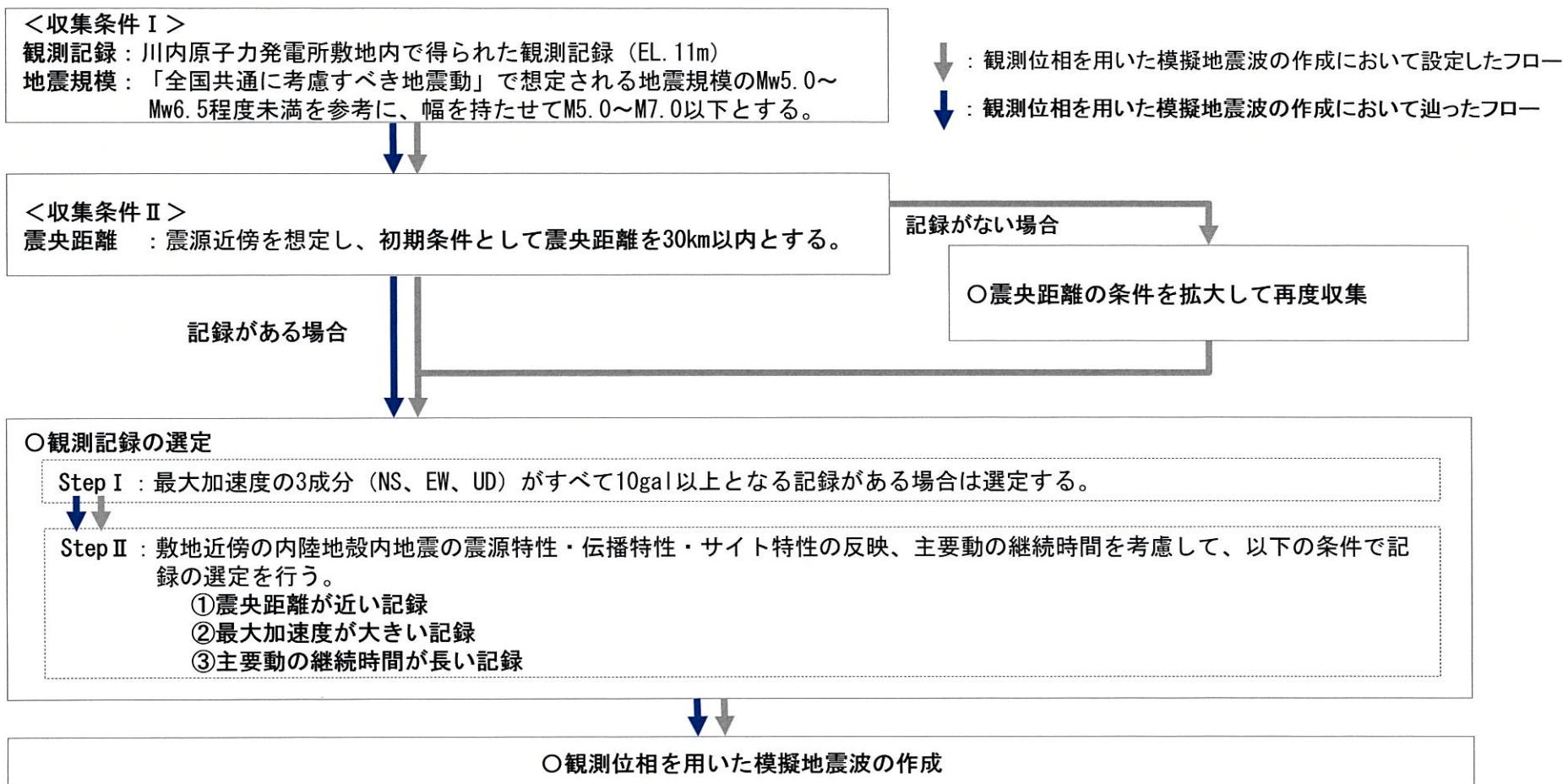


敷地の鉛直アレイ地震計断面位置

3.3 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。

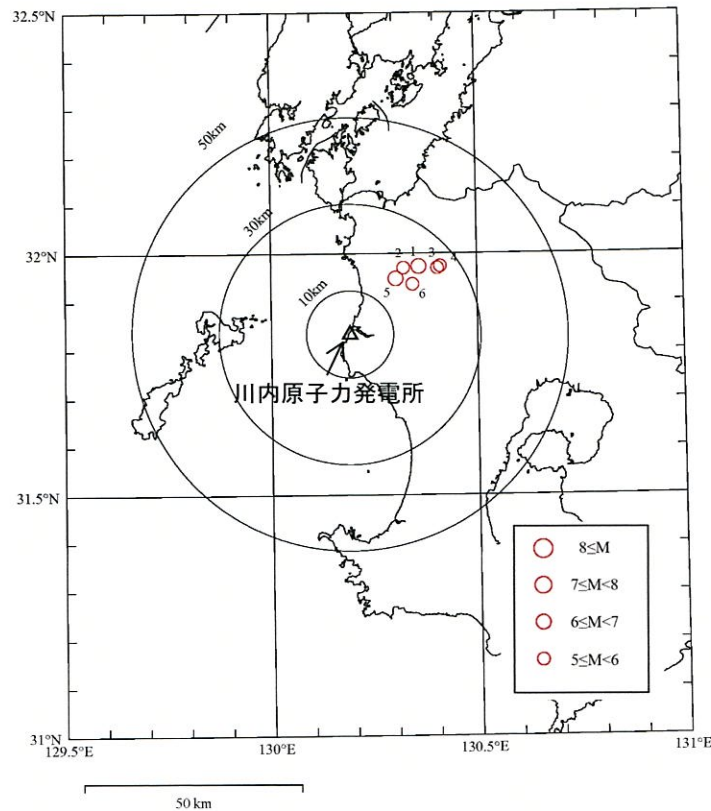


観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集・選定フロー

3.3 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 Step I）

- 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

3.3 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。

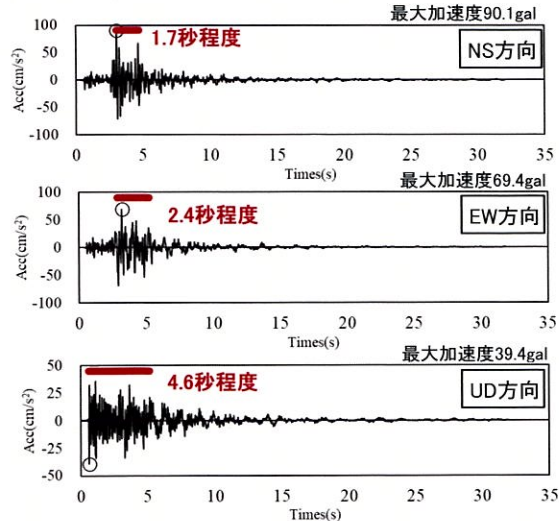
No.	地震名	地震規模 M	①震央距離 (km)	②最大加速度 (gal)	③主要動継続時間※ (秒)			実観測位相の選定
					NS	EW	UD	
1	1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 本震)	6.6	22.2	90.1	<u>1.7</u>	<u>2.4</u>	<u>4.6</u>	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が最も長い
2	1997年4月3日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 余震)	5.7	19.7	60.7	0.6	0.6	1.1	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が短い
5	1997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

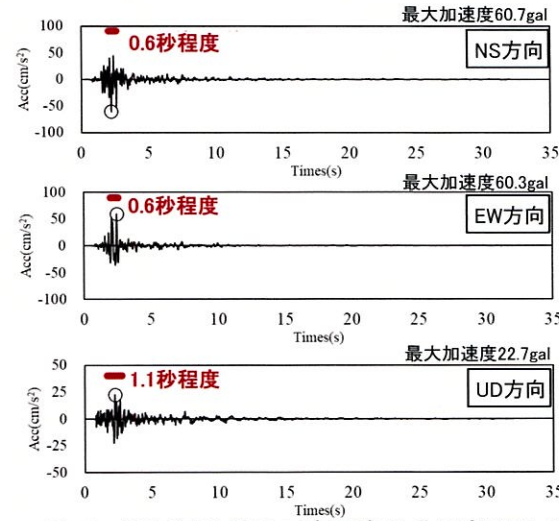
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 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）

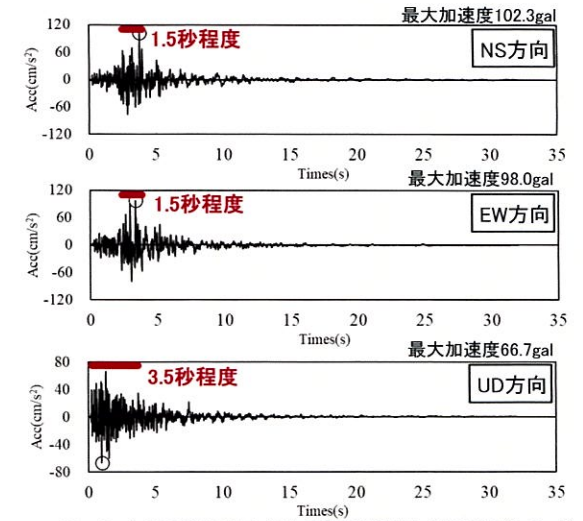
- 3地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。なお、赤線は、主要動の継続時間を示す。



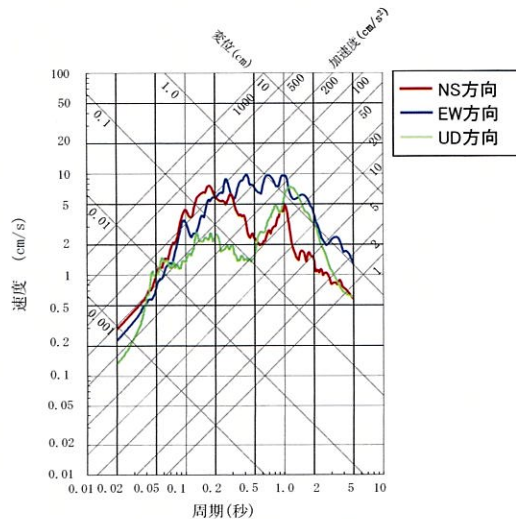
No.1 1997年03月26日 鹿児島県北西部 (M6.6)



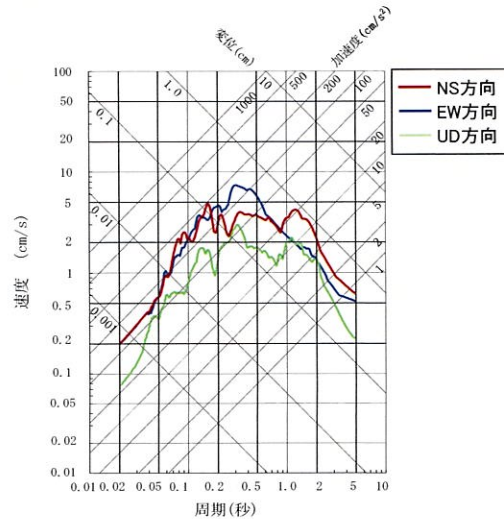
No.2 1997年04月03日 鹿児島県北西部 (M5.7)



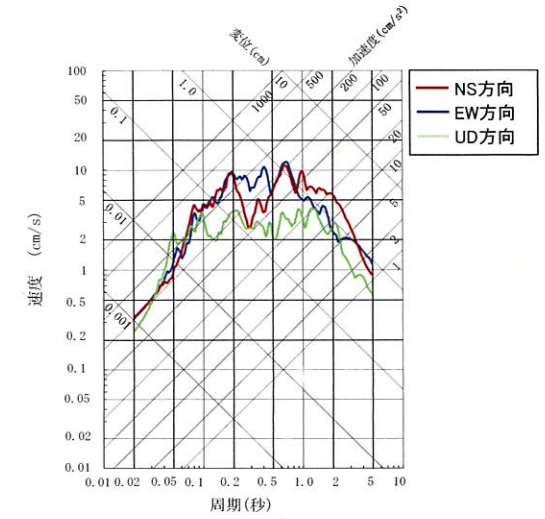
No.5 1997年05月13日 鹿児島県北西部 (M6.4)



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)

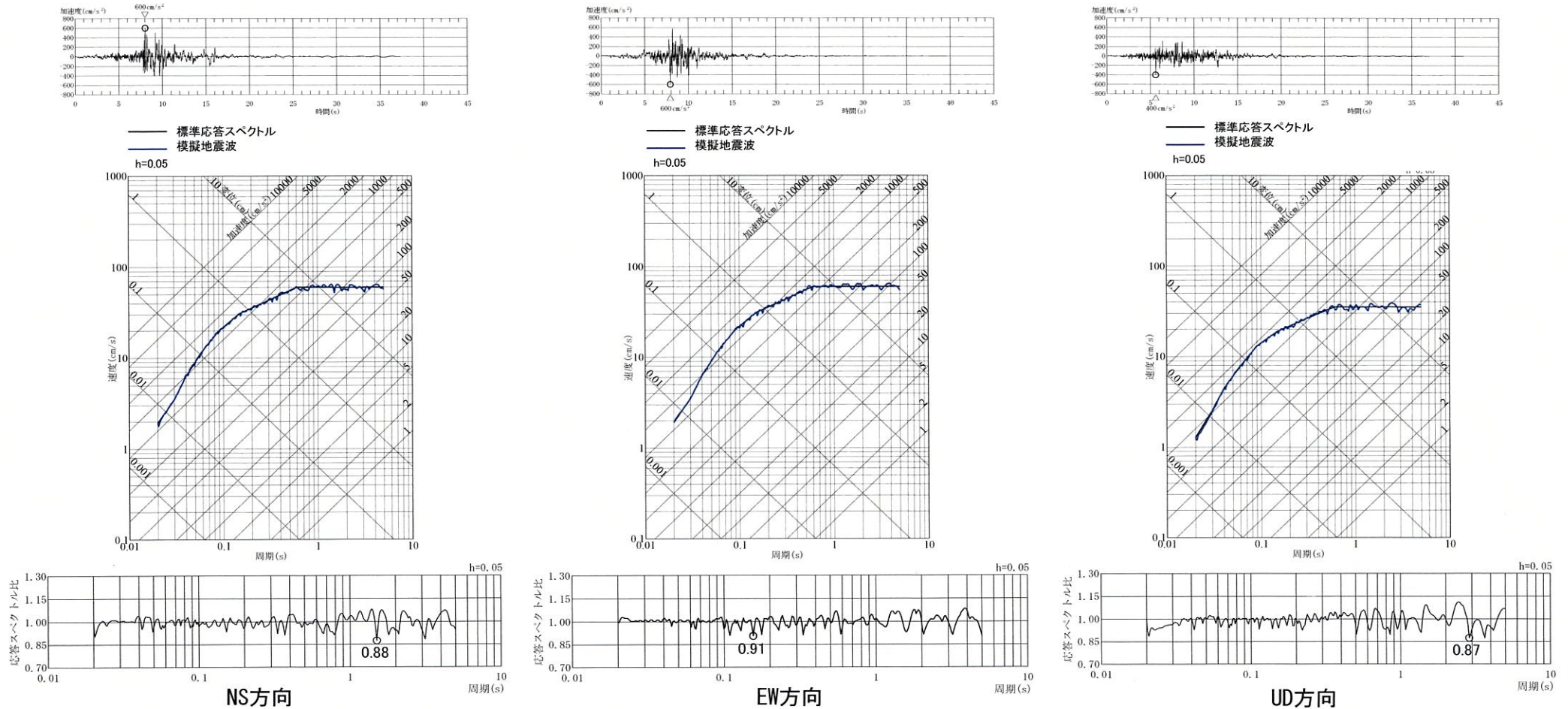


No.5 1997年05月13日
鹿児島県北西部 (M6.4)

3.3 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)⁴⁾に記載された判定基準を満足することを確認した。

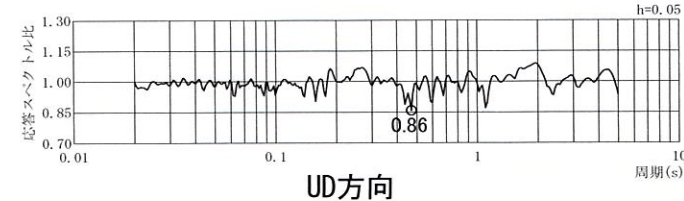
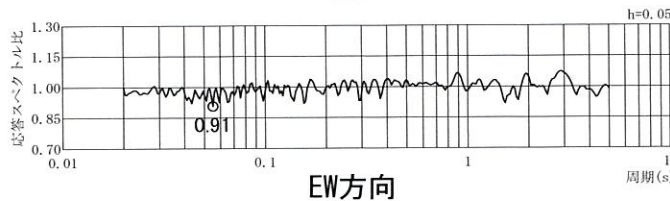
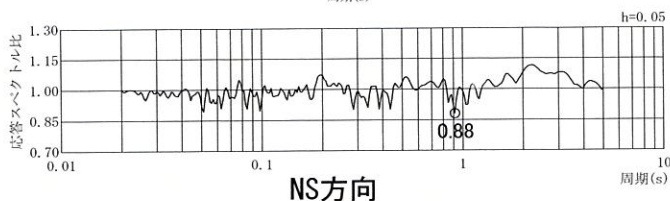
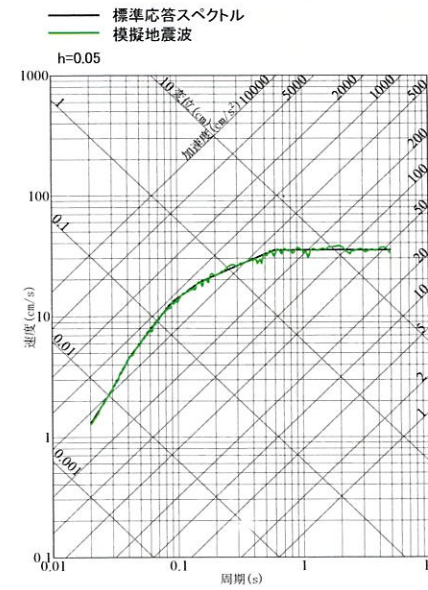
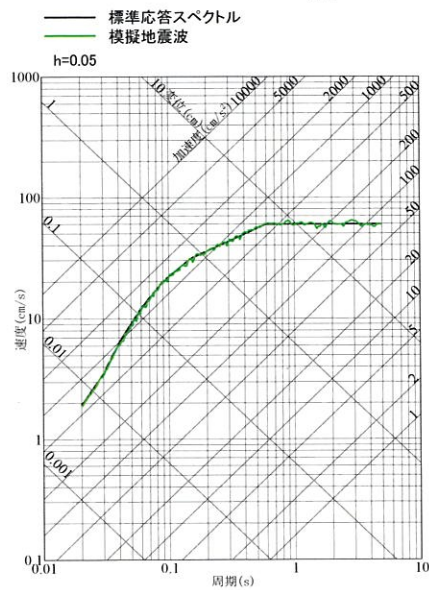
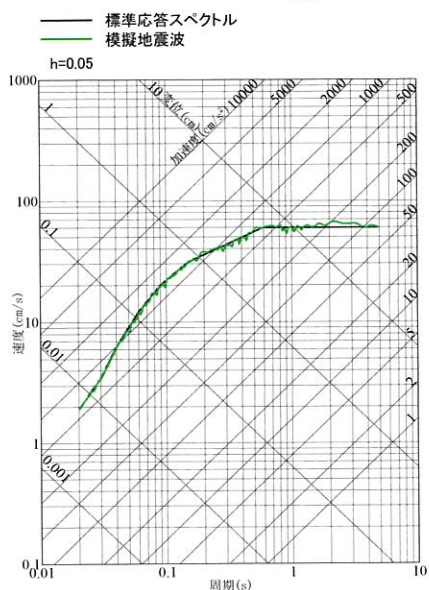
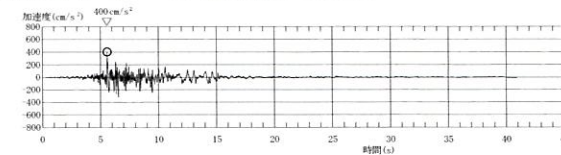
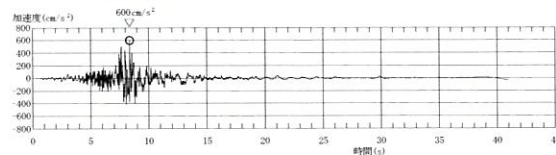
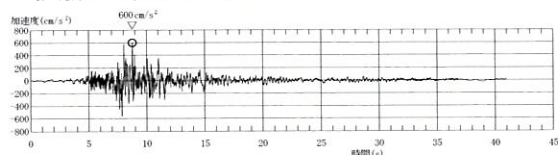


作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
①応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85	0.91 ≥ 0.85	0.87 ≥ 0.85
②SI比	1.00 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00

3.3 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)⁴⁾に記載された判定基準を満足することを確認した。

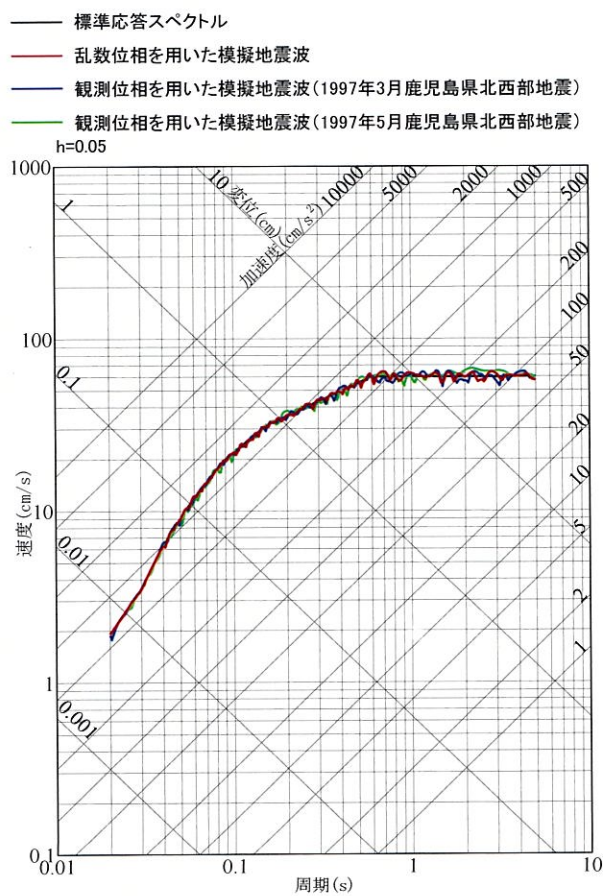


作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
①応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85	0.91 ≥ 0.85	0.86 ≥ 0.85
②SI比	1.03 ≥ 1.00	1.00 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00

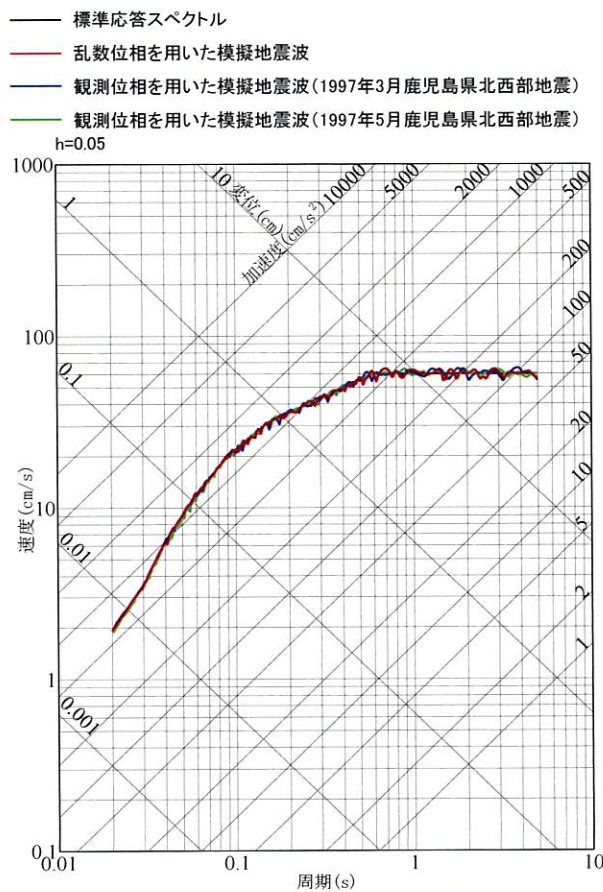
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 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）

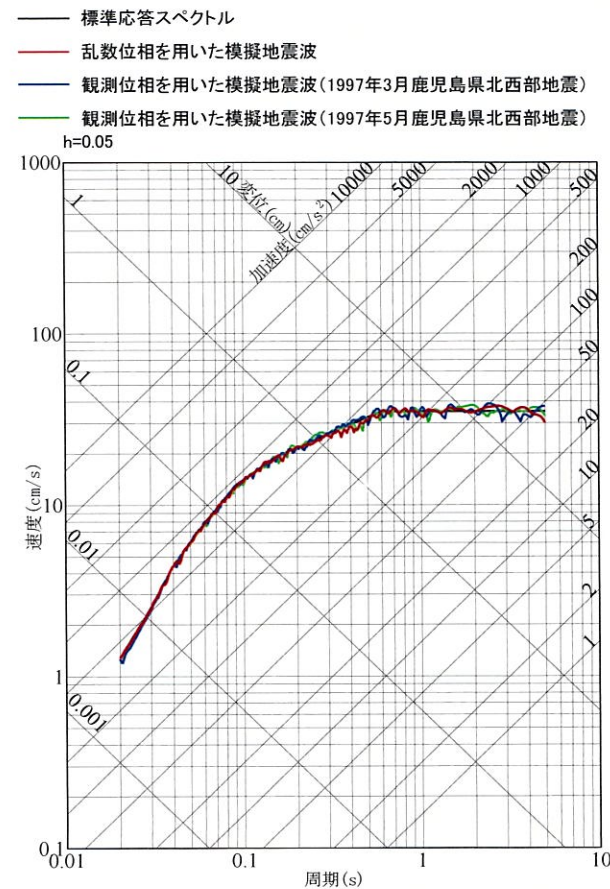
- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトルの比較を以下に示す。
- 両者の応答スペクトルは、標準応答スペクトルに適合するよう作成していることから、有意な差は見られない。



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

3.4 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">最大加速度の大きさ強震部の継続時間[※]の長さ	<ul style="list-style-type: none">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
②応答スペクトル	<ul style="list-style-type: none">周期ごとの応答値の大きさ周期ごとの応答値の比の大きさ	<ul style="list-style-type: none">解放基盤表面における応答スペクトルの比較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

※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。

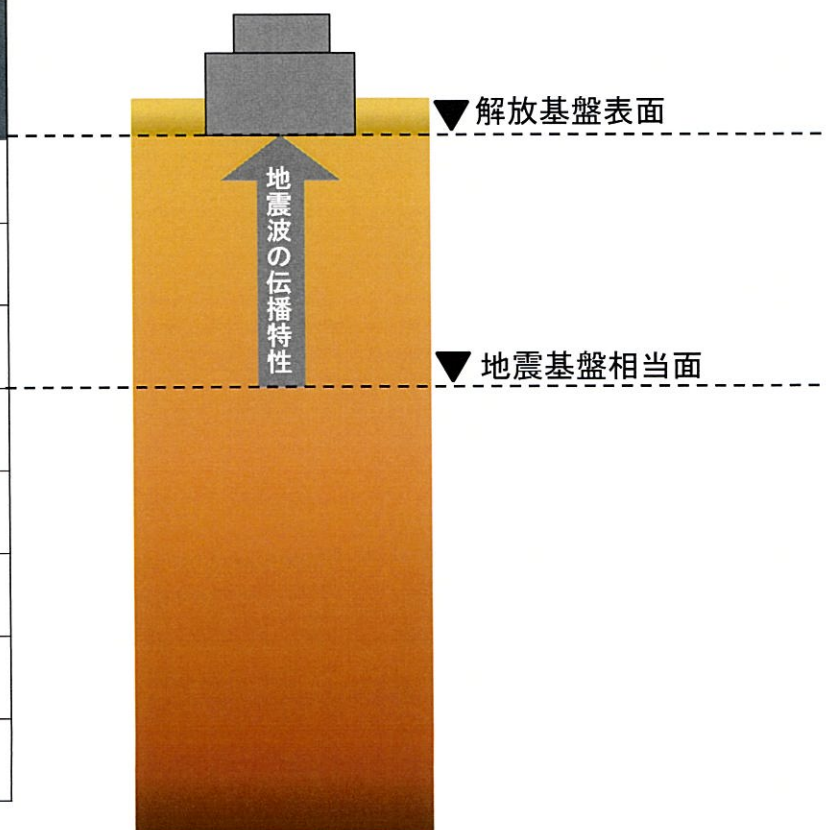
3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 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 ρ (g/cm ³)	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



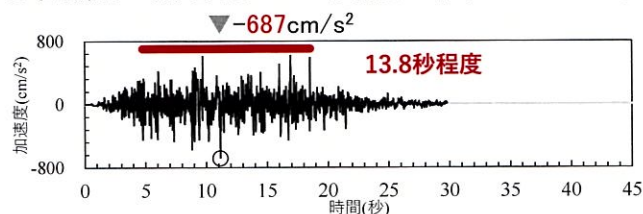
標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

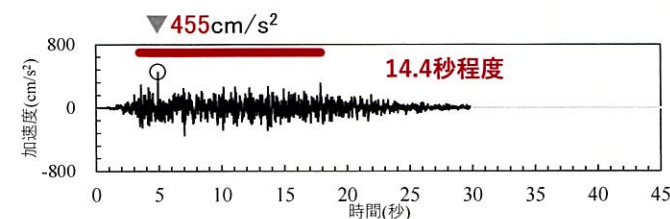
■ 解放基盤表面の地震波の比較：①時刻歴波形

- 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、鉛直方向ともに乱數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、鉛直方向ともに乱數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。

● 乱數位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波

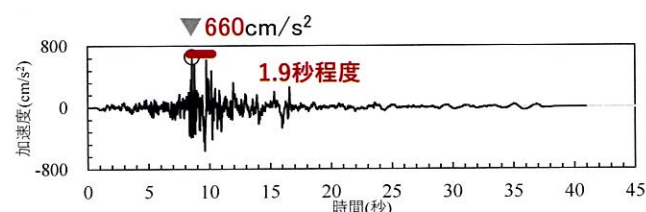


水平方向

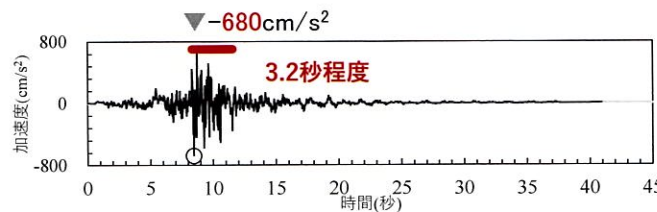


鉛直方向

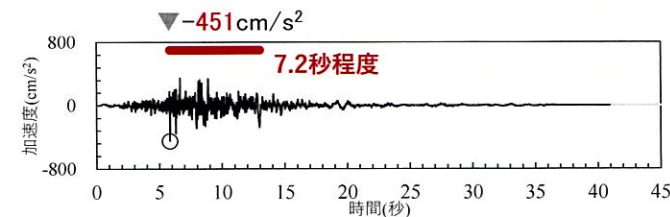
● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波(1997年3月鹿児島県北部地震)



NS方向

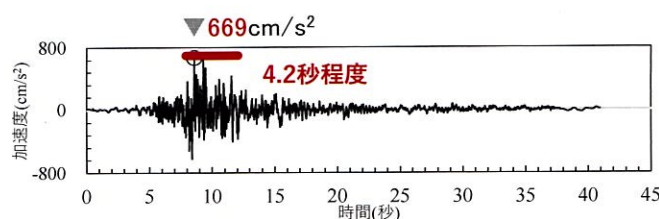


EW方向

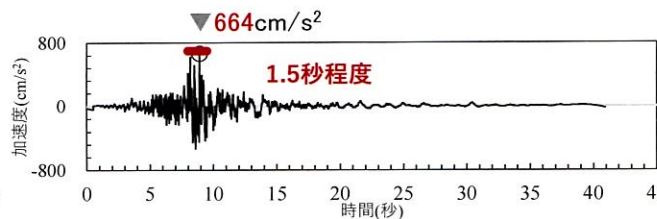


UD方向

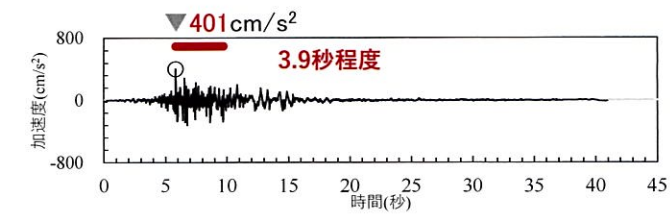
● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波(1997年5月鹿児島県北部地震)



NS方向



EW方向

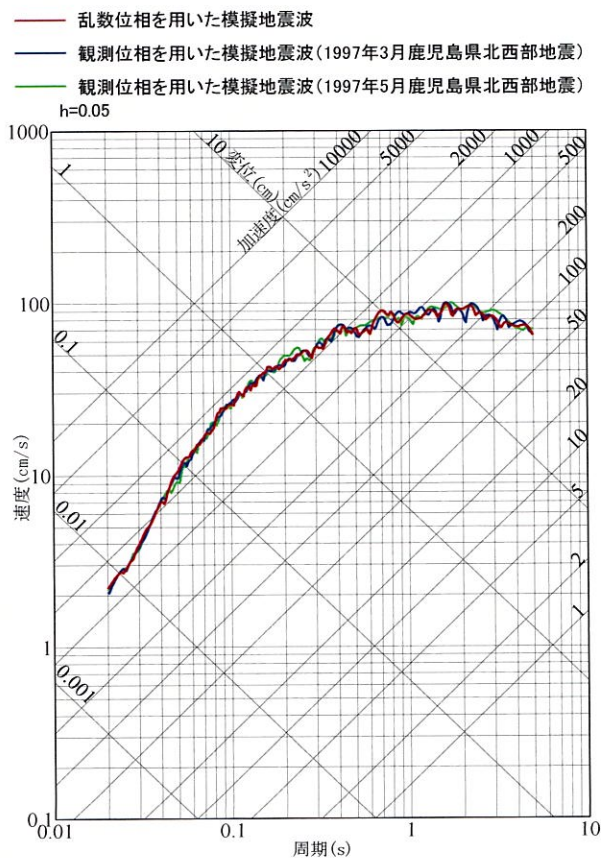


UD方向

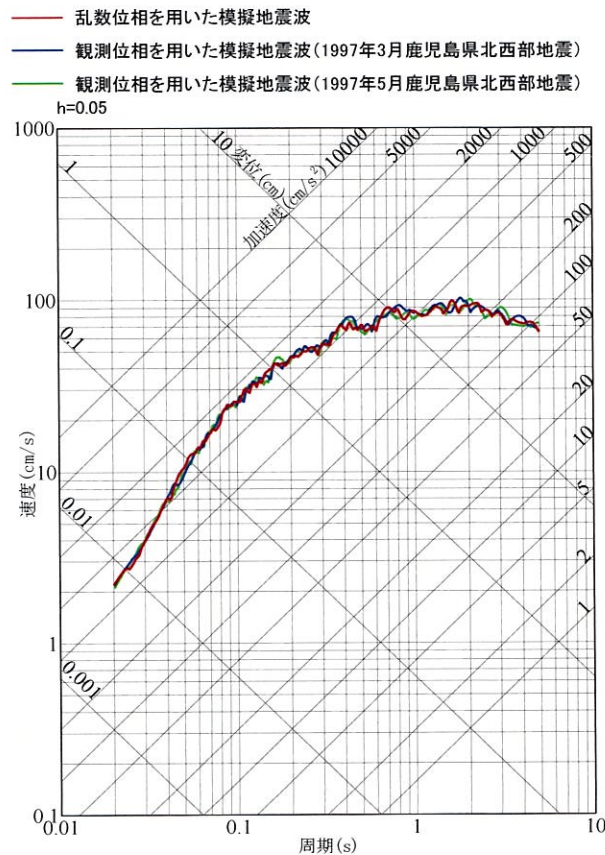
3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の比較：②応答スペクトル

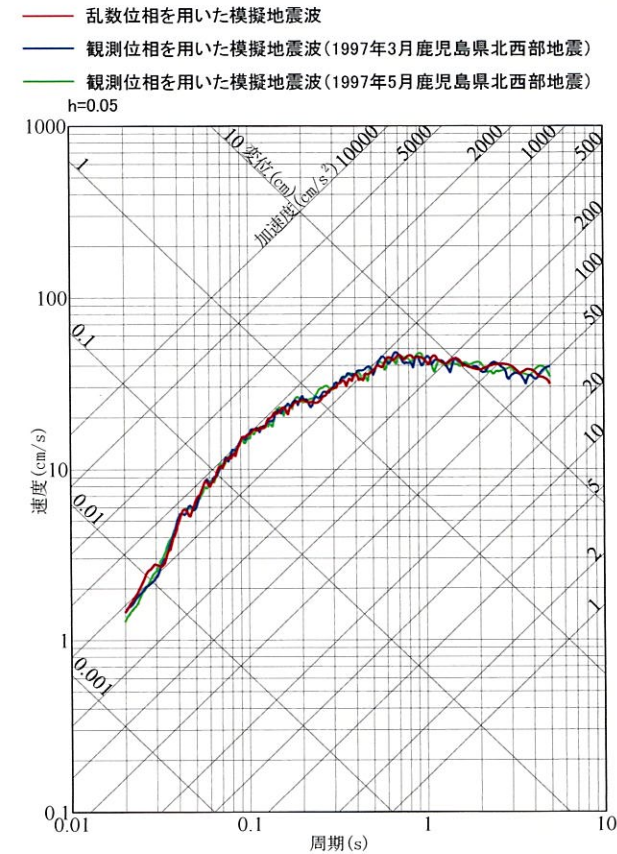
- 乱數位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の応答スペクトルを以下に示す。
- 解放基盤表面での両者の応答スペクトルは同程度であり、位相の違いによる影響がないことを確認。



NS方向



EW方向



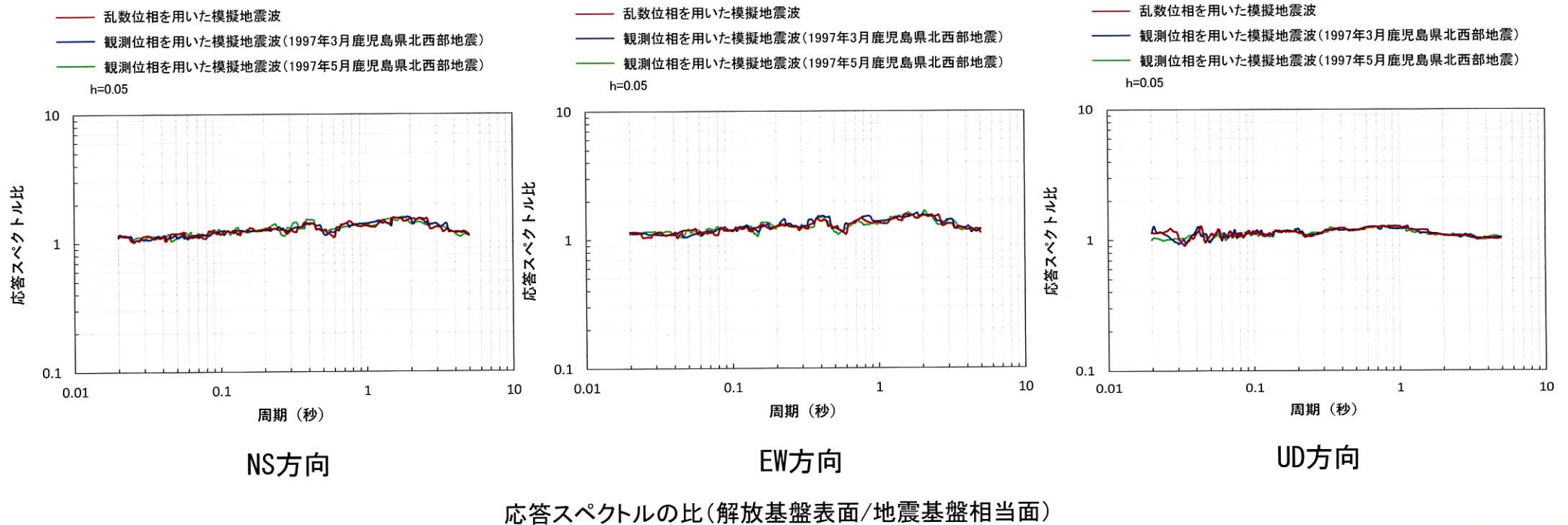
UD方向

解放基盤表面の地震波の応答スペクトル

3.4 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。



3.4 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