

川内原子力発電所1号炉、2号炉審査資料	
資料番号	TTS-074
提出年月日	2023年12月4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12月4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. 111
【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. 117
【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. 127
【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. 133

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

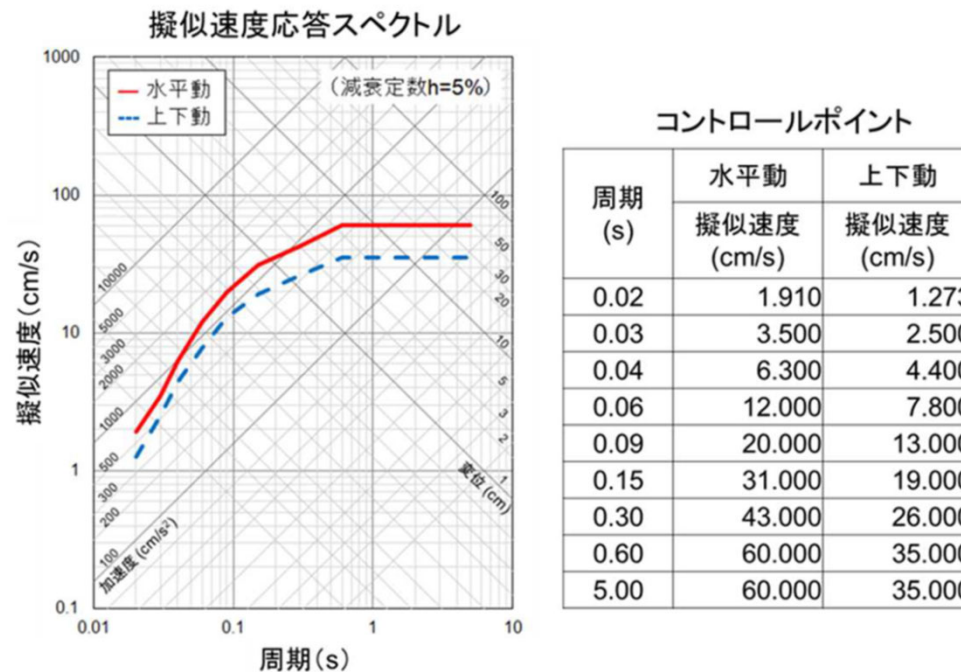
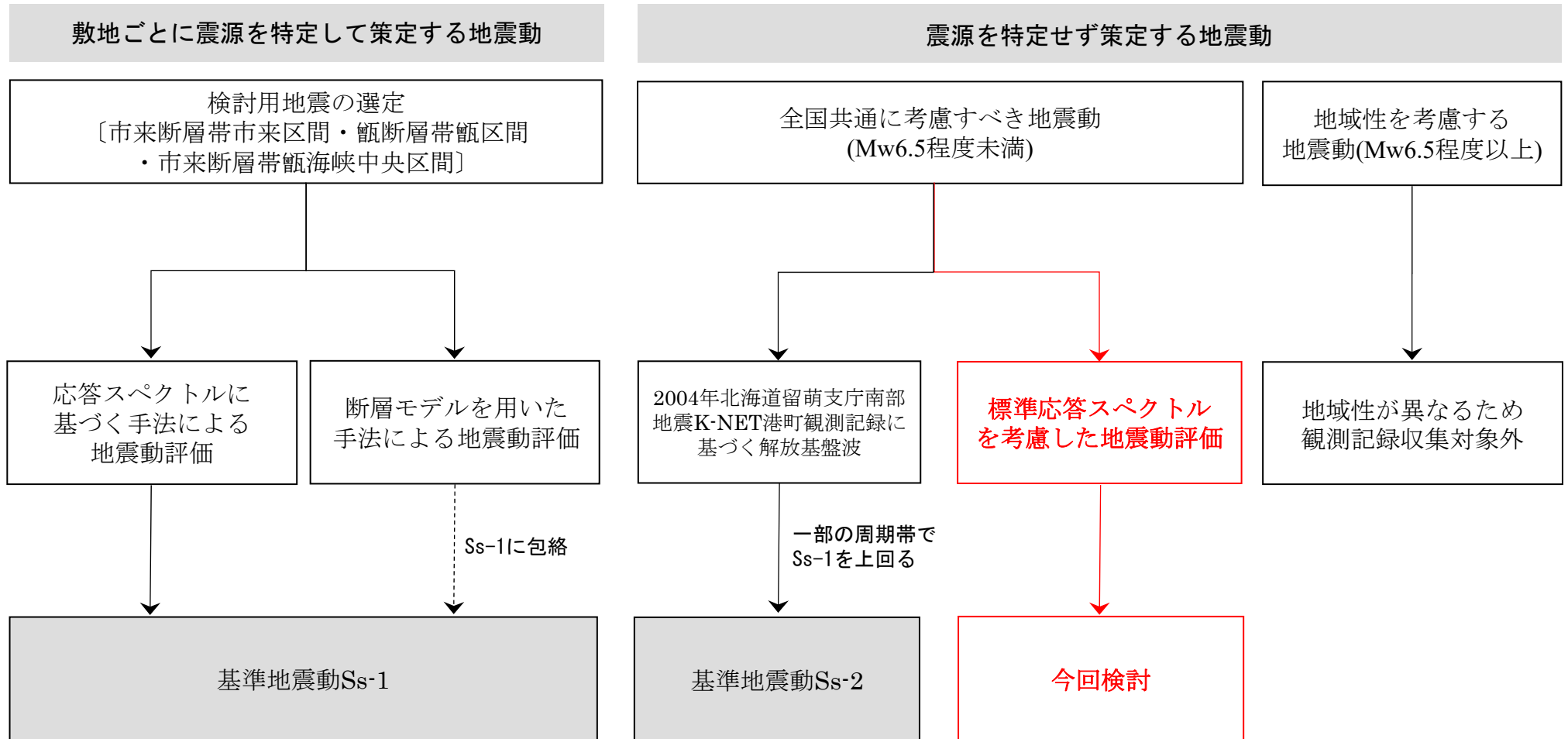


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- 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

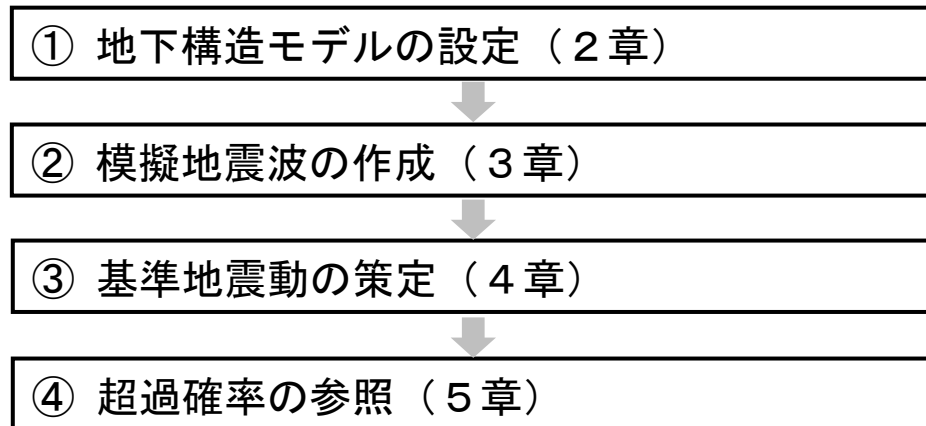
(単位：cm/s²)

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		S _s	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		S _{s-1}	540	324
震源を特定せず策定する地震動		S _s	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	S _{s-2}	620	320
	標準応答スペクトル	今回検討		

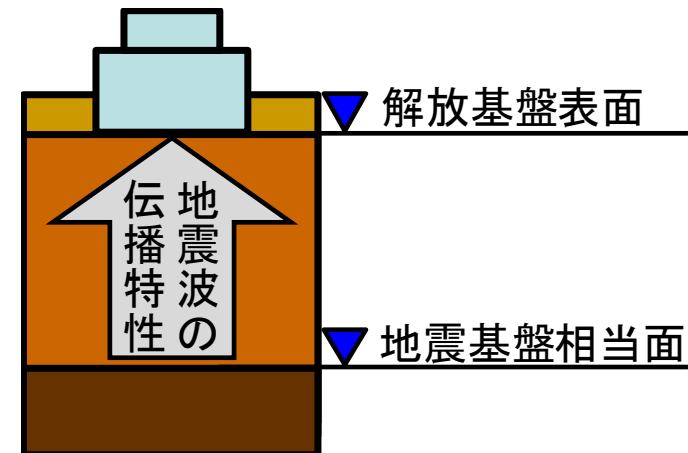
1. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の流れ

■ 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。



標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価の流れ



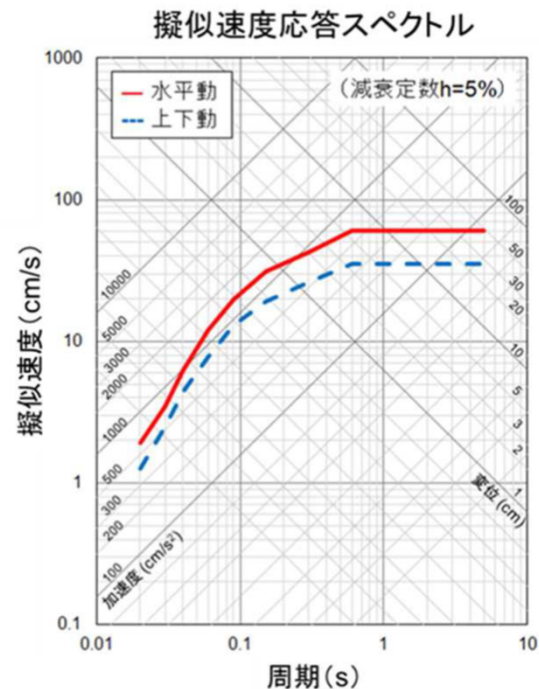
標準応答スペクトルを考慮した
地震動評価のイメージ

2. 地下構造モデルの設定

2.1 地下構造モデルの設定

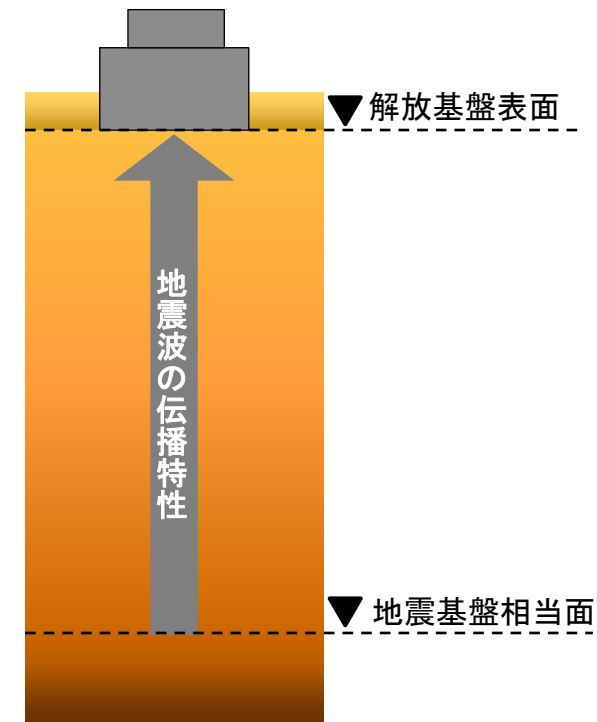
■ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

- 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。



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)

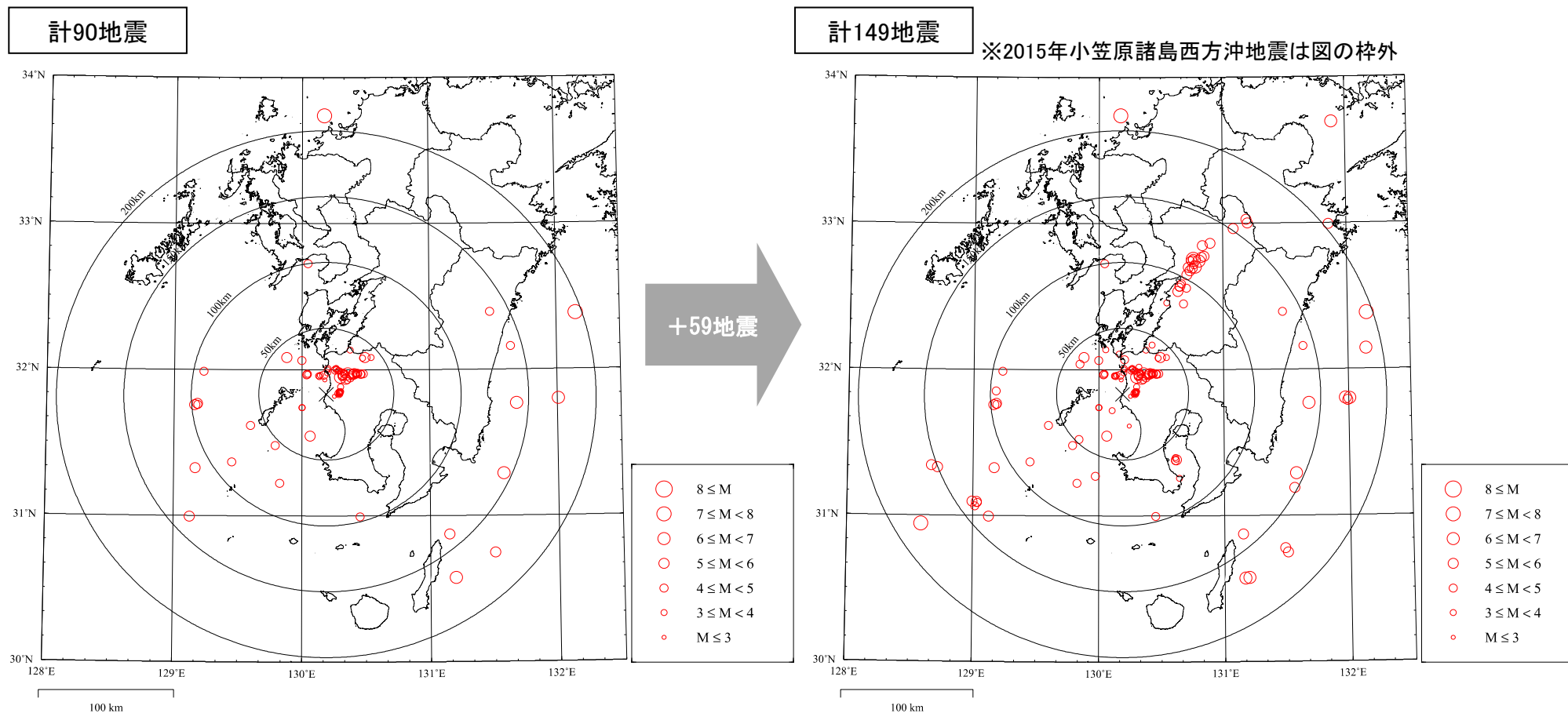
既許可モデルの設定根拠

	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結果 を基に設定	慣用値 (Vs/15~ Vs/10) を基に設定
EL. -118.5m ----- EL. -480m	-0.01	2.70	1600	3700	100	上層の 岩石試験結果 を基に設定	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) を基に設定	
EL. -3018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	地震調査委員会(2003) を基に設定		
EL. -17018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300			
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）



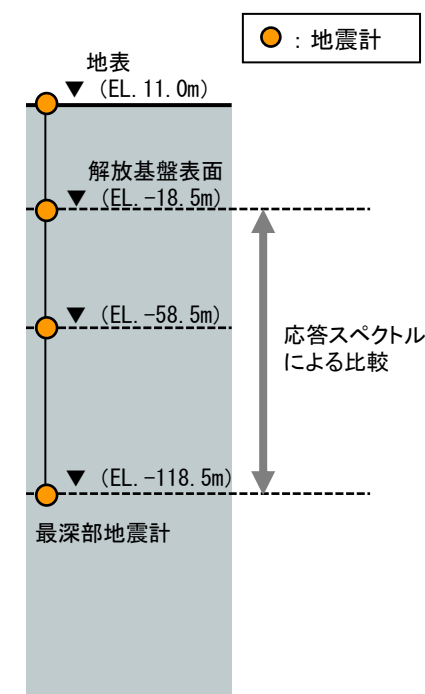
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

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

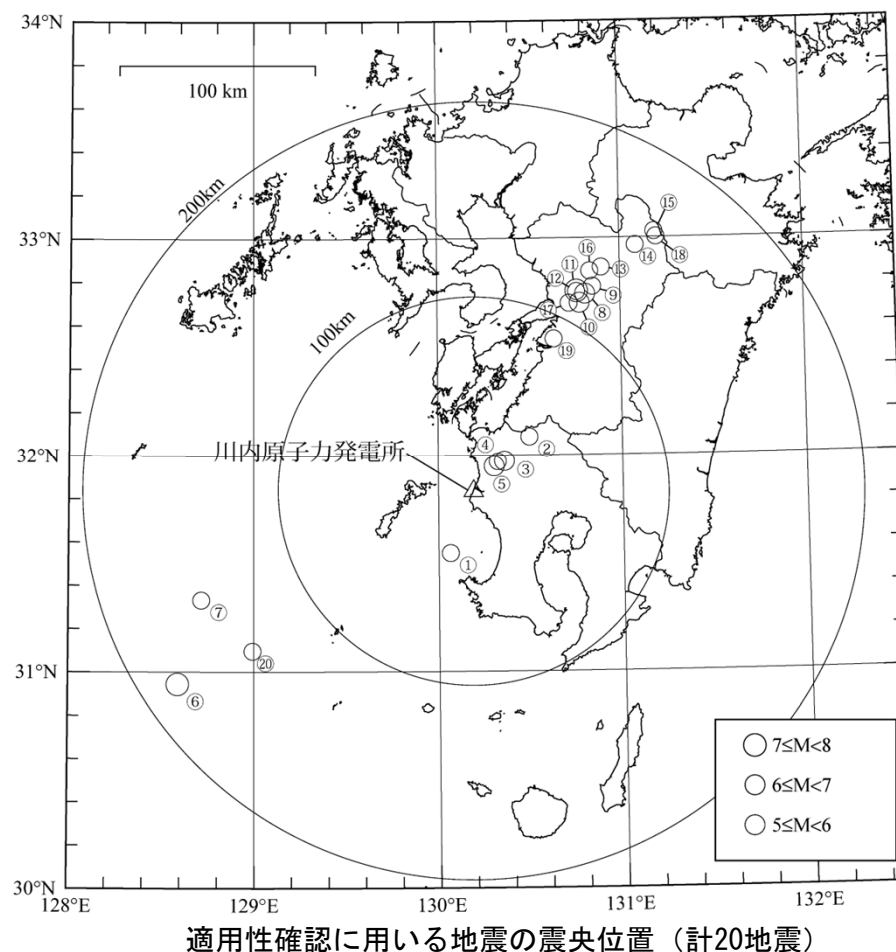
適用性確認に用いる地震諸元 (計20地震)

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	128	25
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑲	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



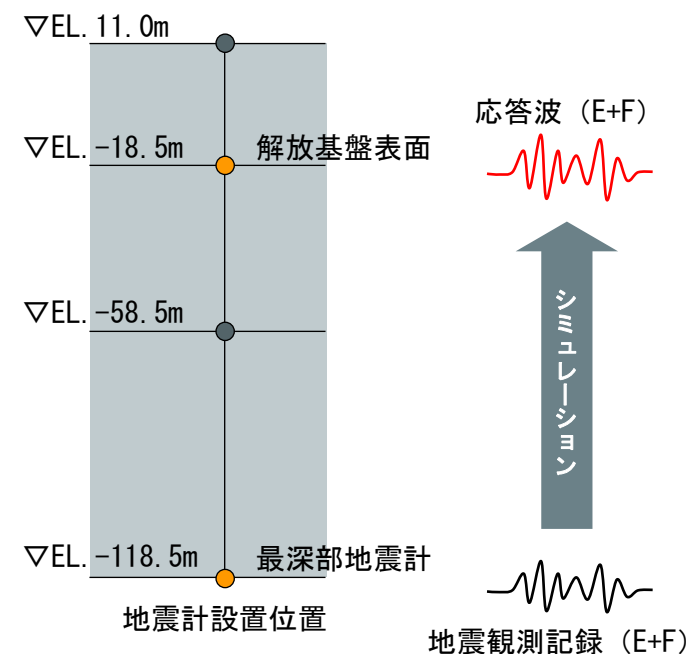
今回新たに追加



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。

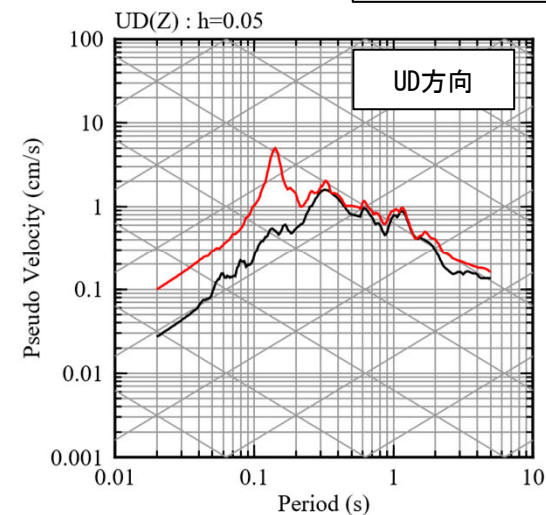
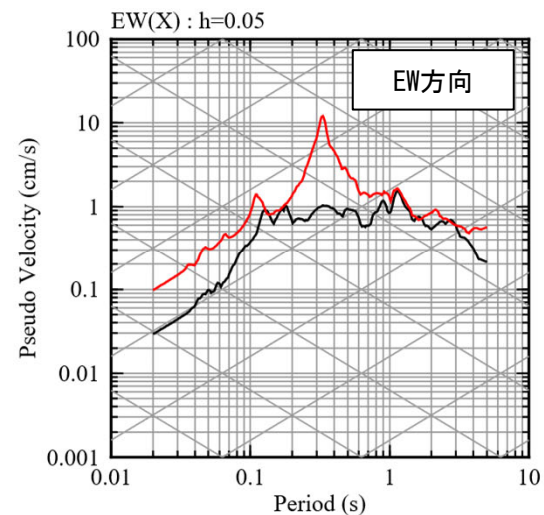
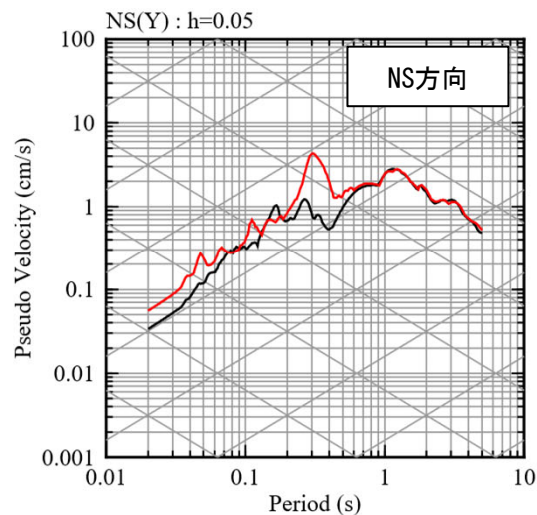


※入力 of 最深部地震計 (EL. -118.5m) で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤表面 (EL. -18.5m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価

2.2 地下構造モデルの適用性確認

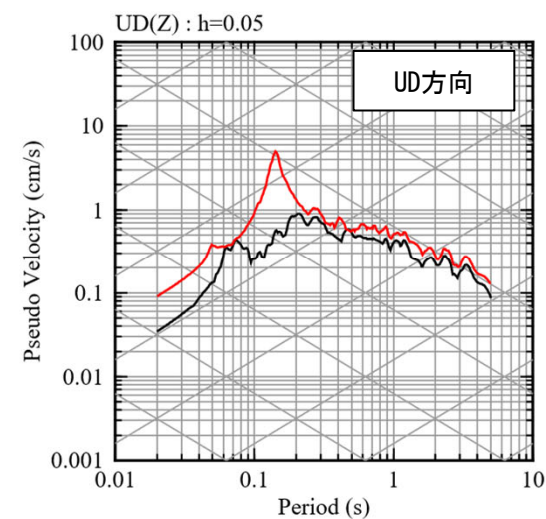
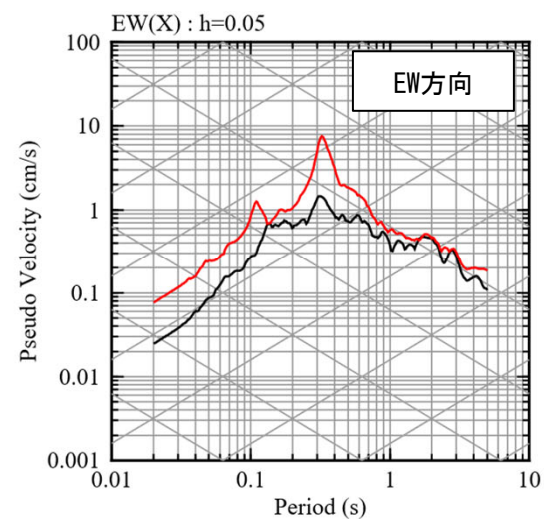
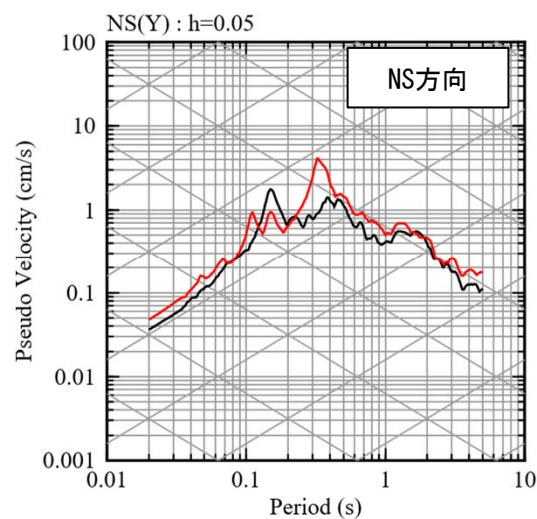
■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

①九州西側海域



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

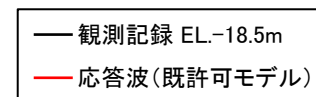
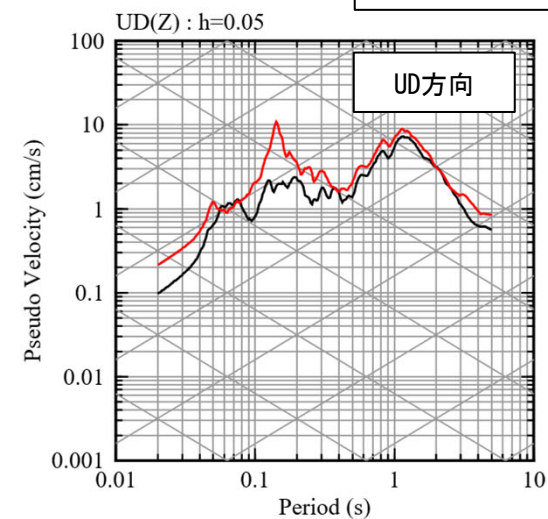
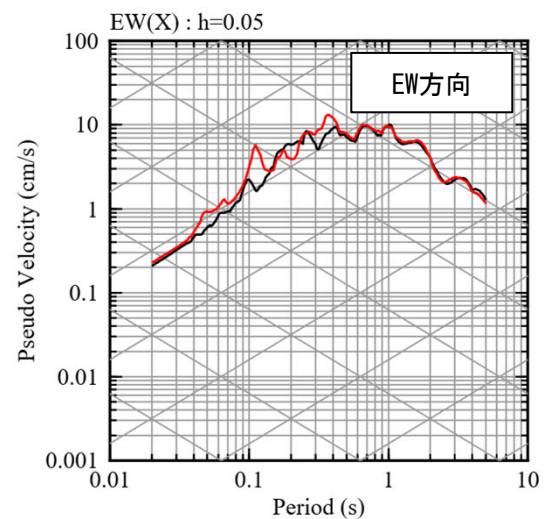
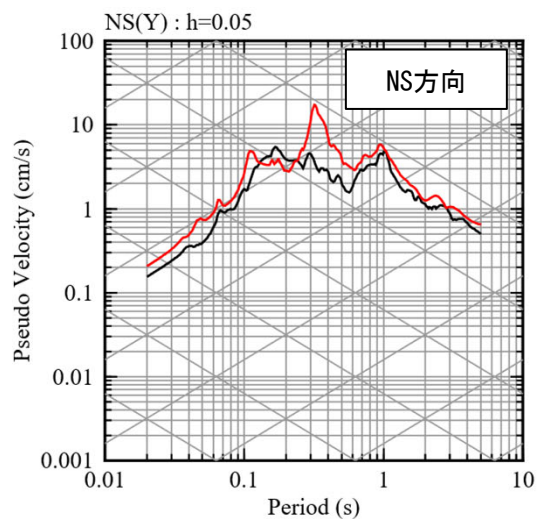
②鹿児島県北西部



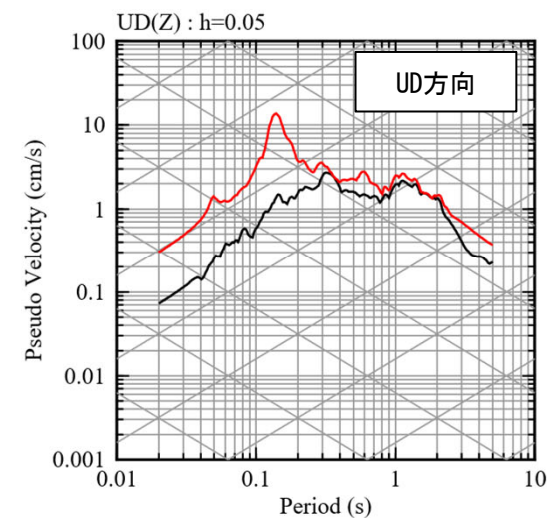
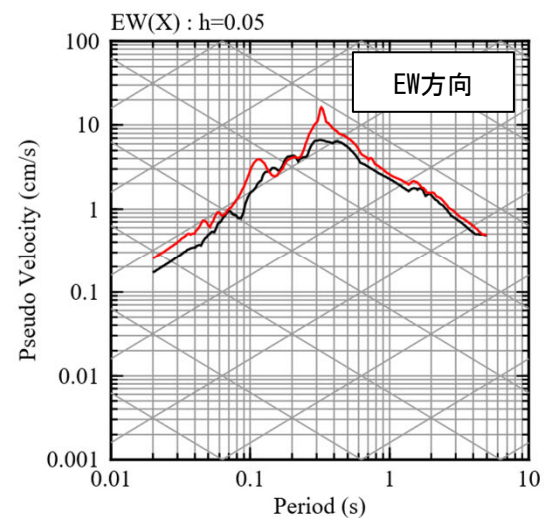
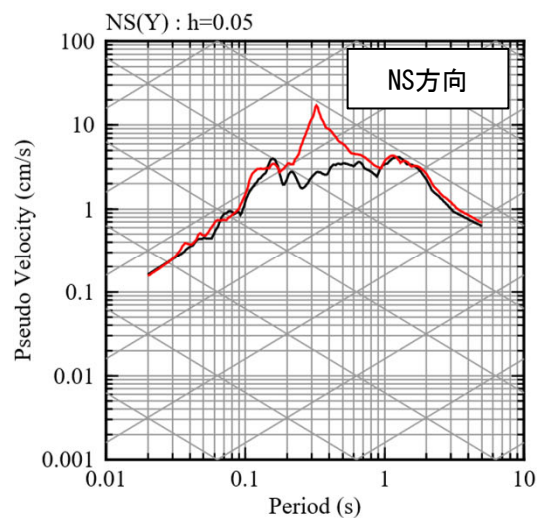
2.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 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)



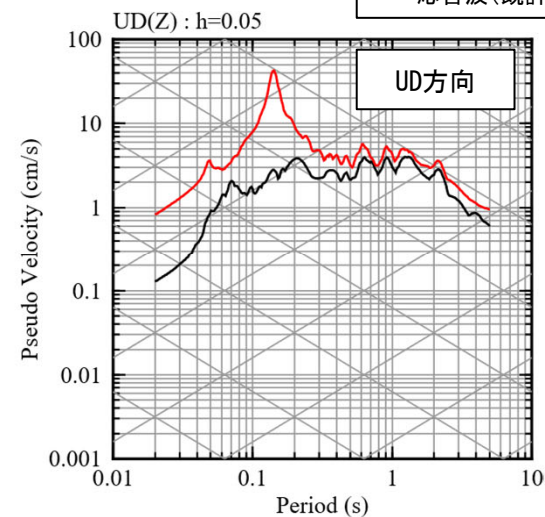
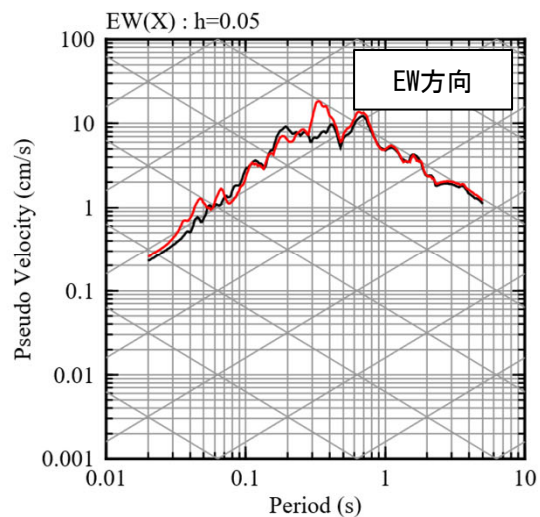
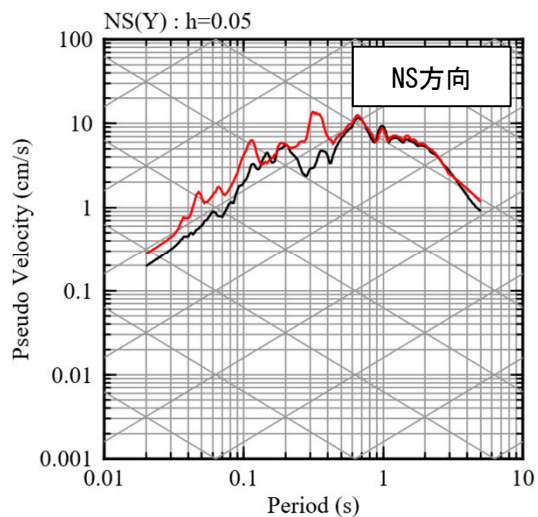
④ 鹿児島県北西部



2.2 地下構造モデルの適用性確認

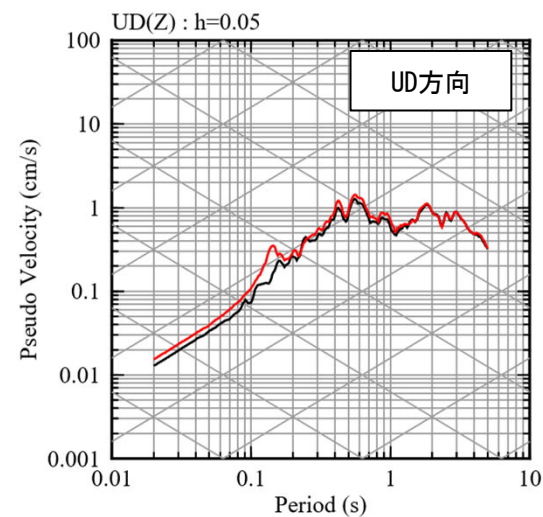
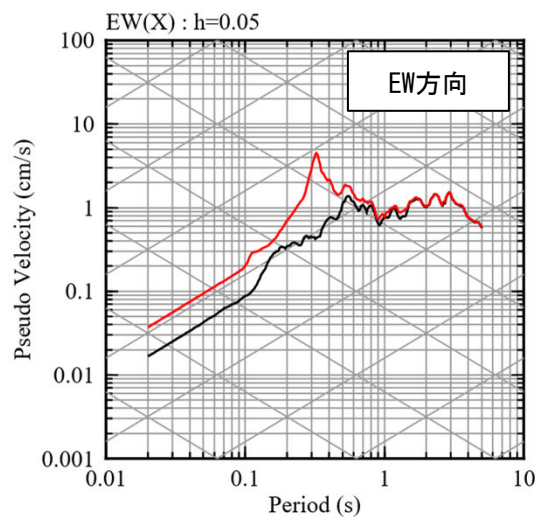
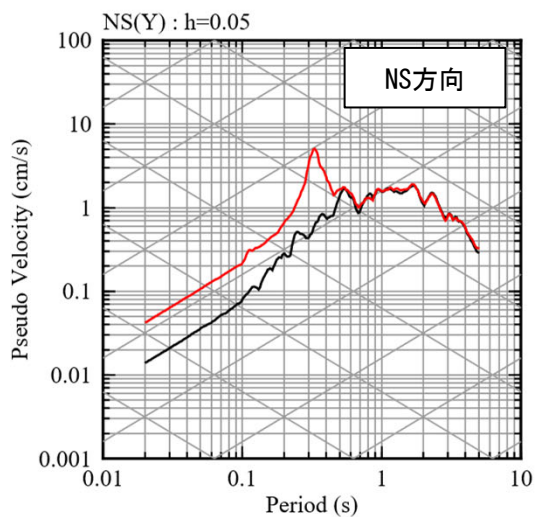
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

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)

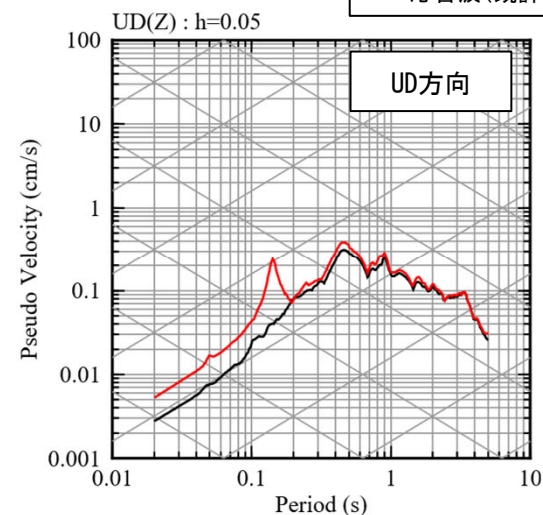
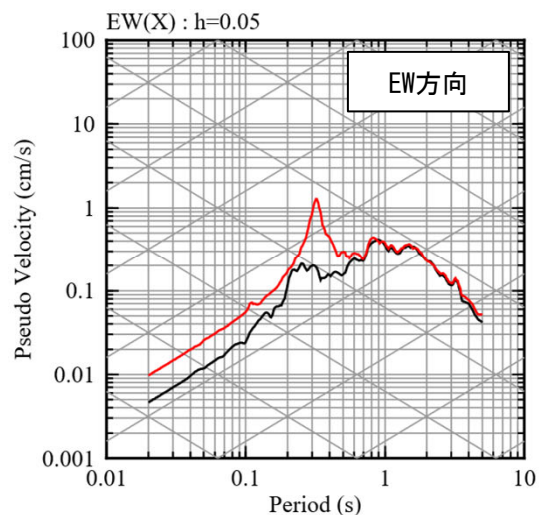
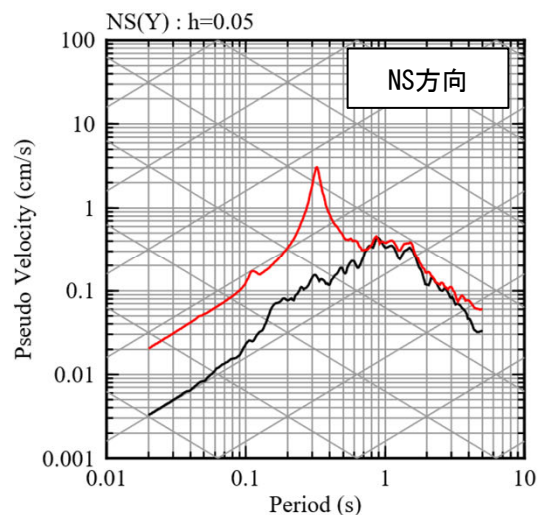
⑥ 薩摩半島西方沖



2.2 地下構造モデルの適用性確認

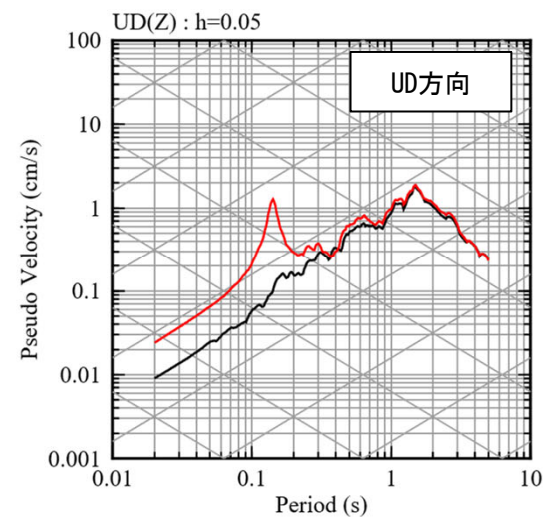
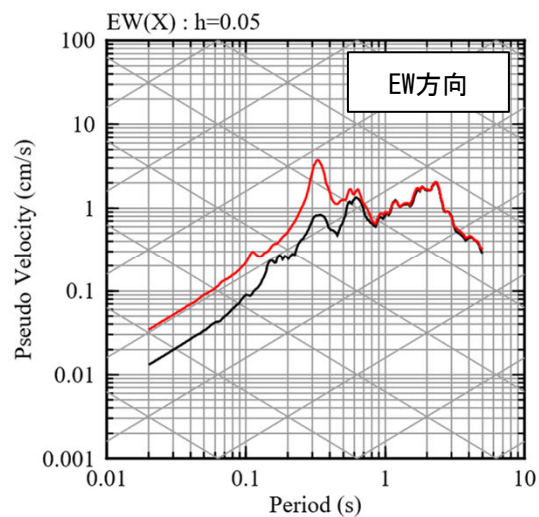
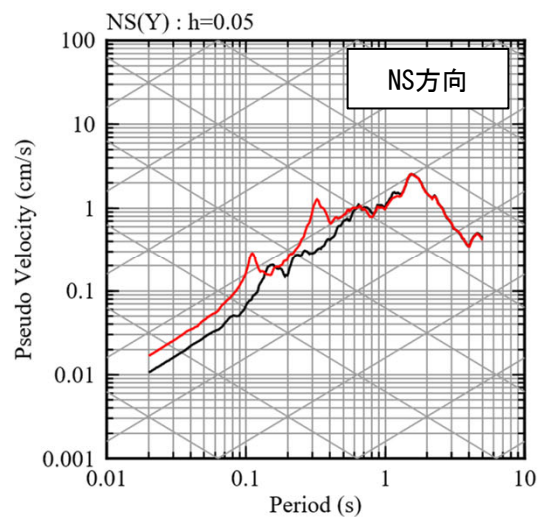
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑦ 薩摩半島西方沖



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

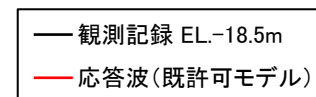
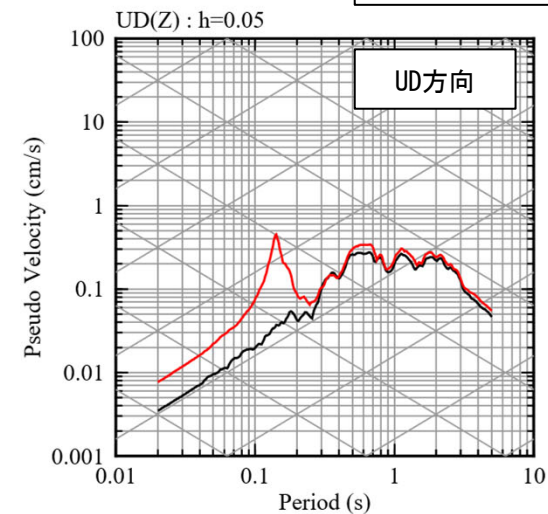
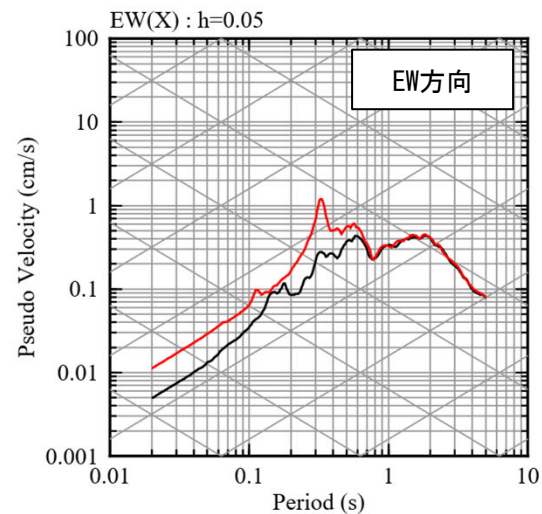
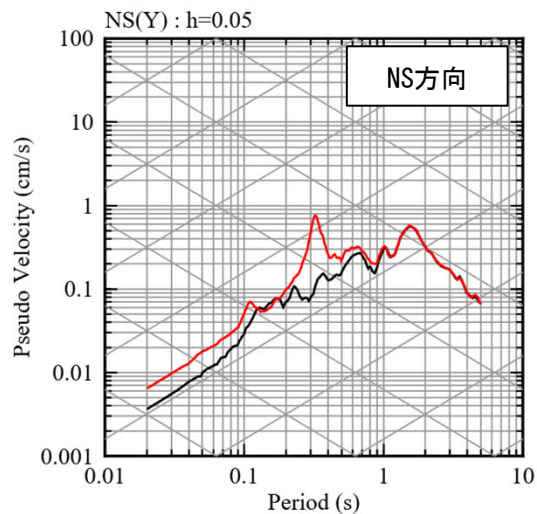
⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



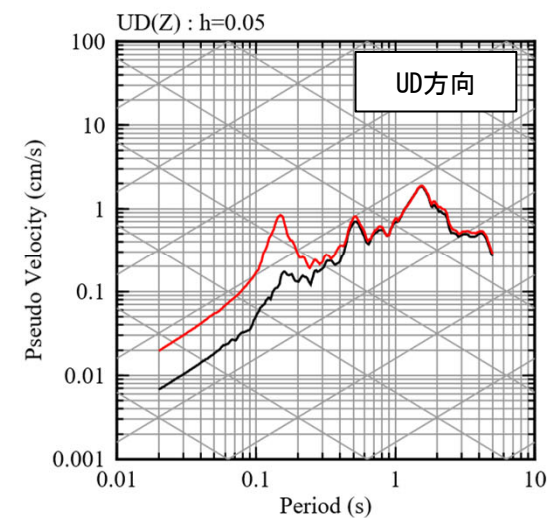
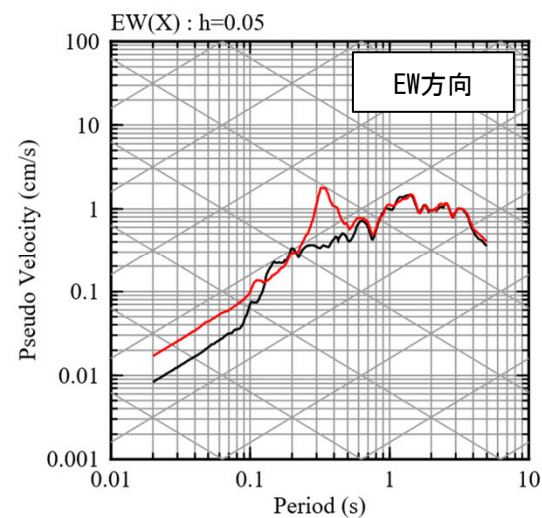
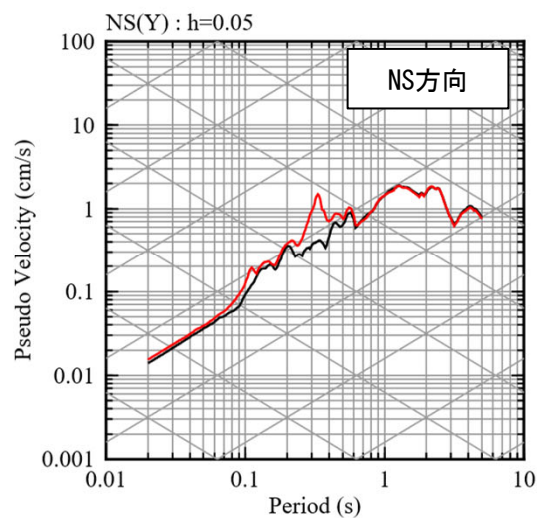
2.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑨ 熊本県熊本地方



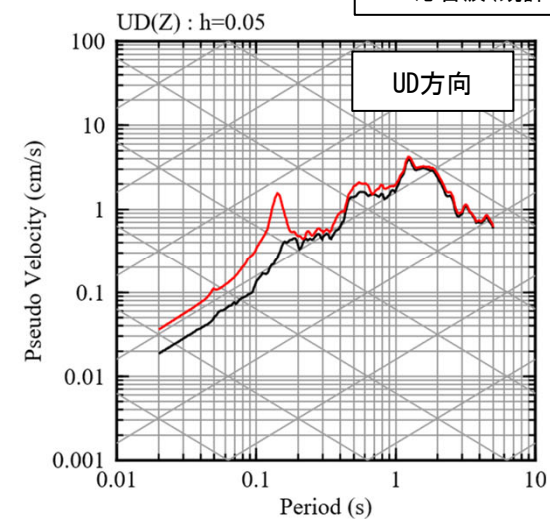
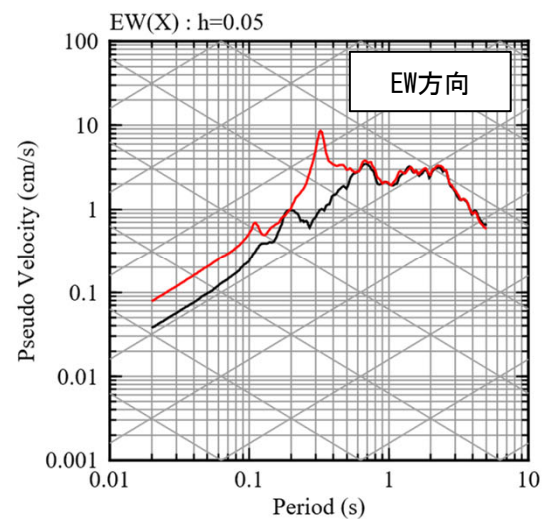
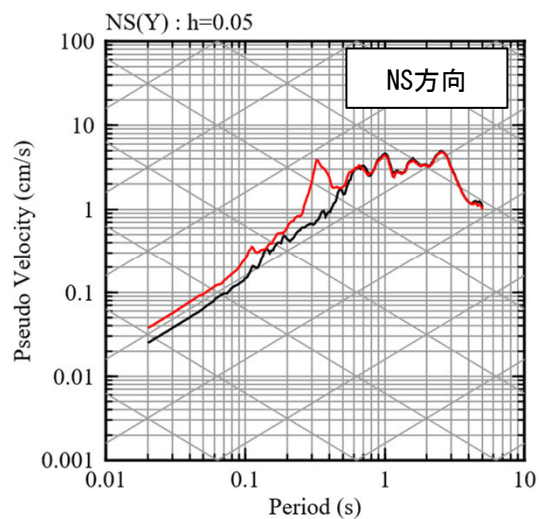
⑩ 熊本県熊本地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

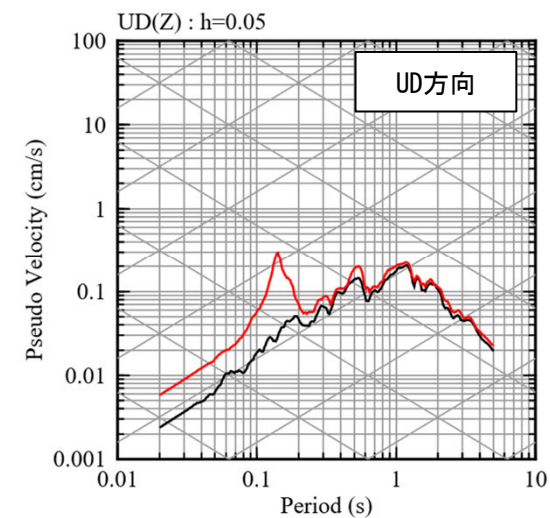
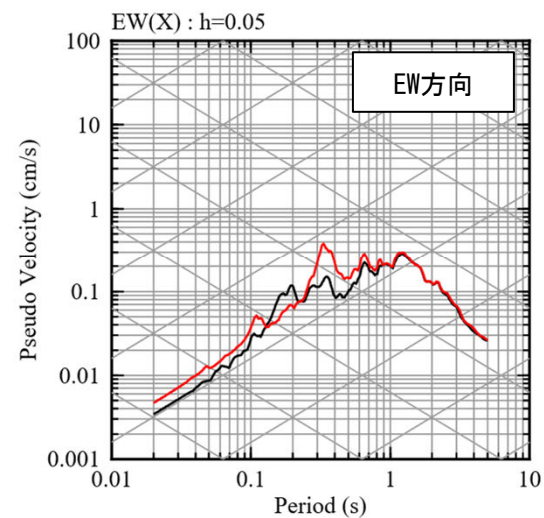
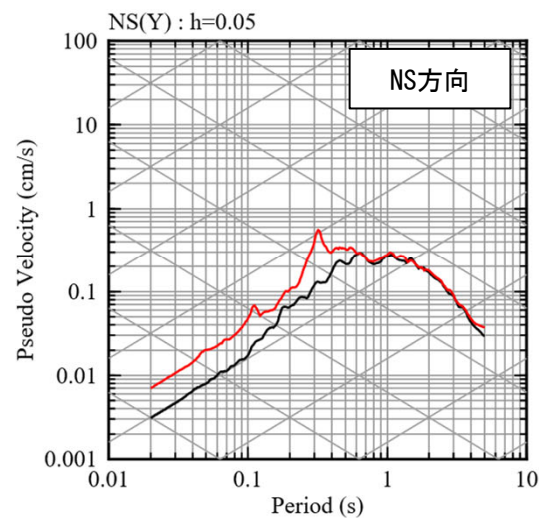
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

① 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)

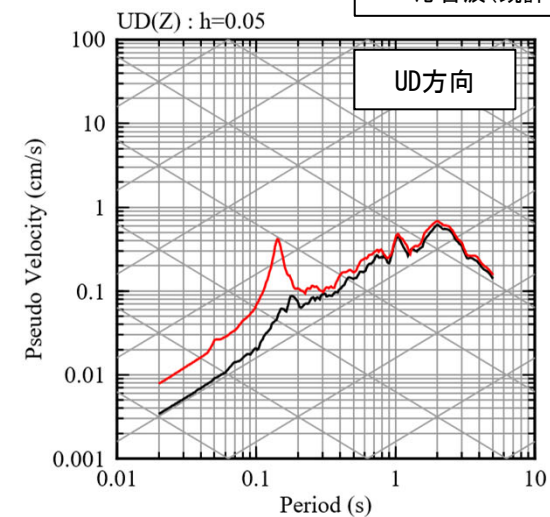
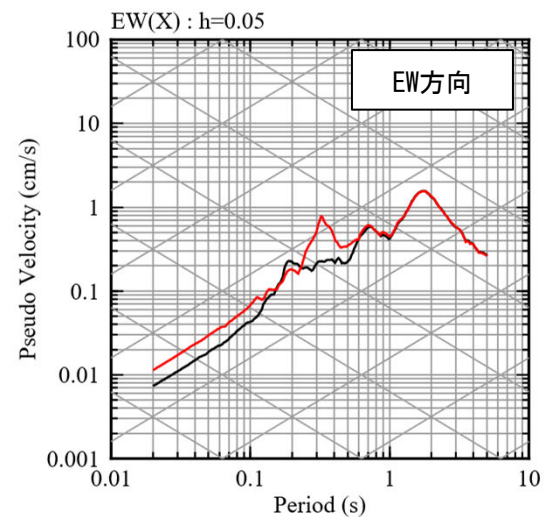
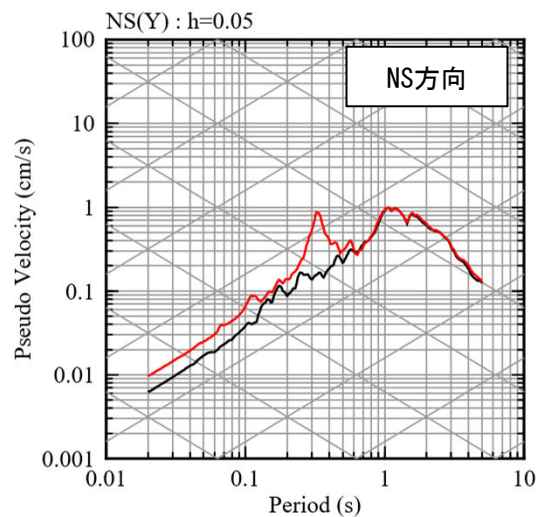
② 熊本県熊本地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

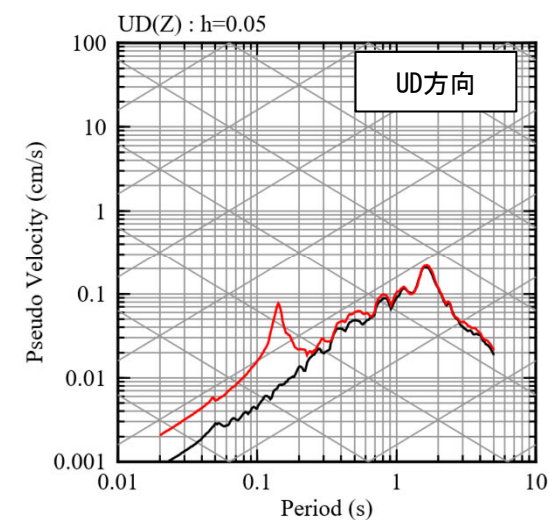
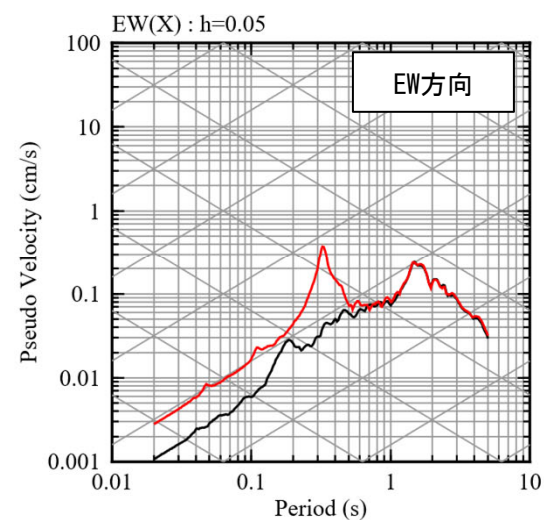
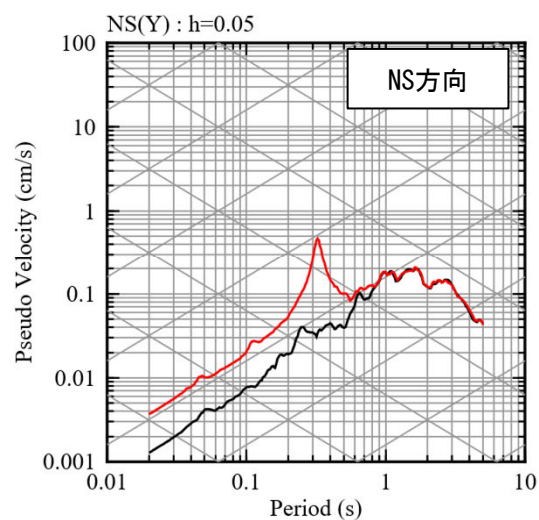
■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑬ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

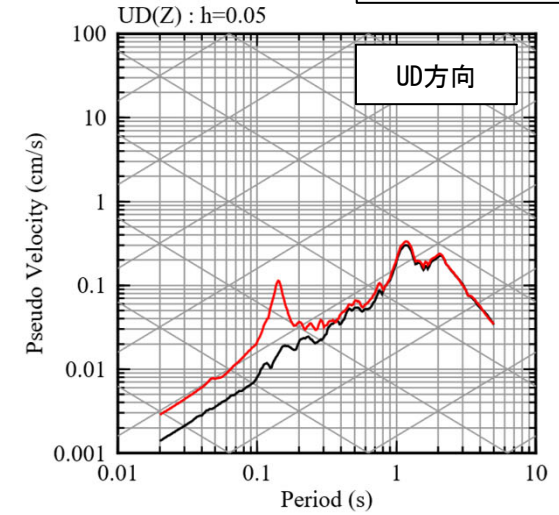
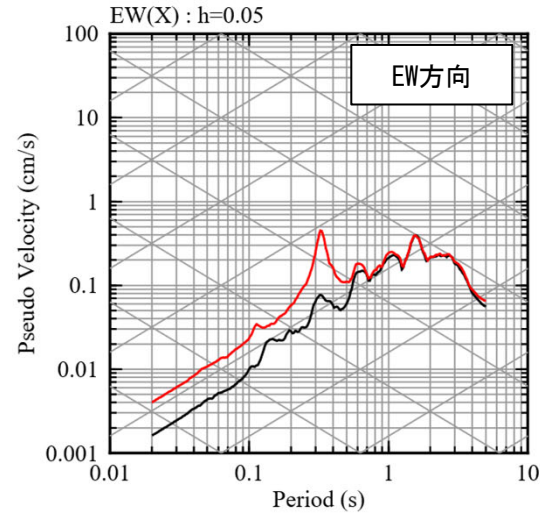
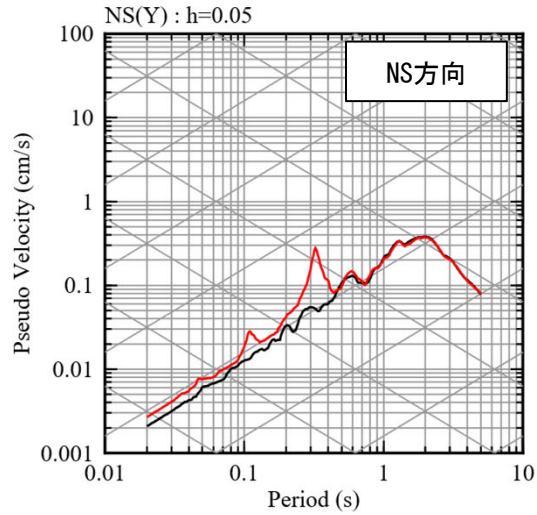
⑭ 熊本県阿蘇地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

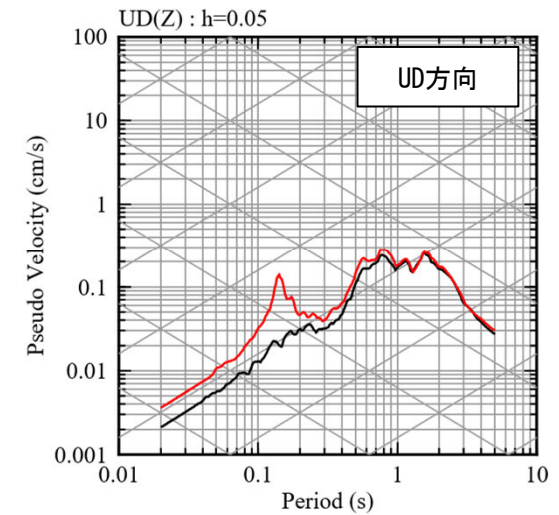
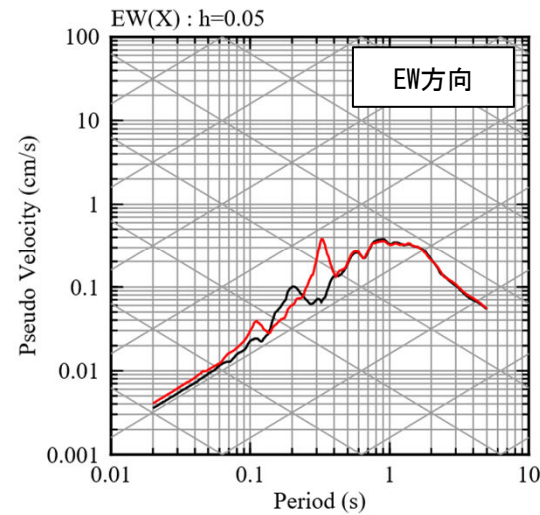
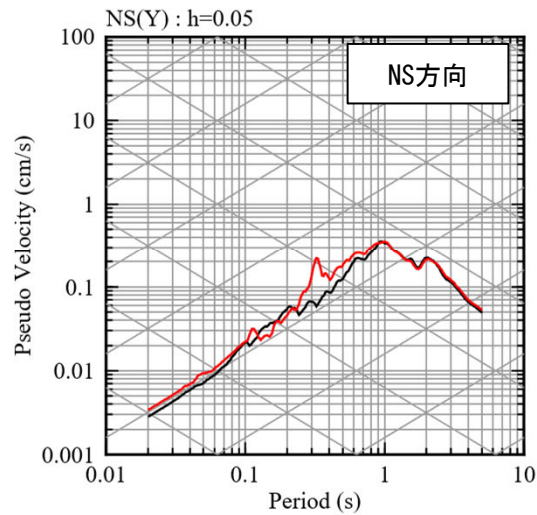
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑮ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

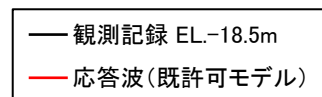
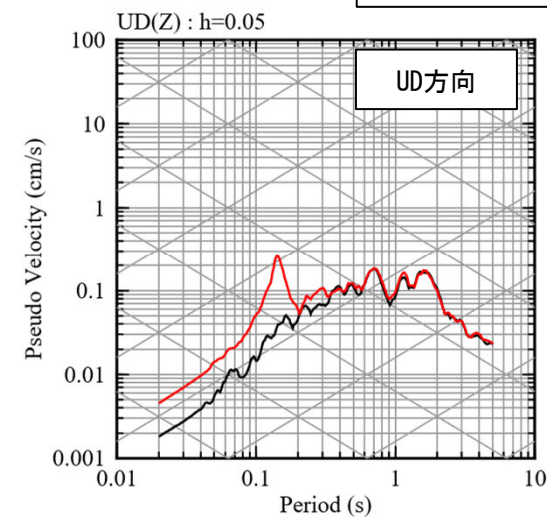
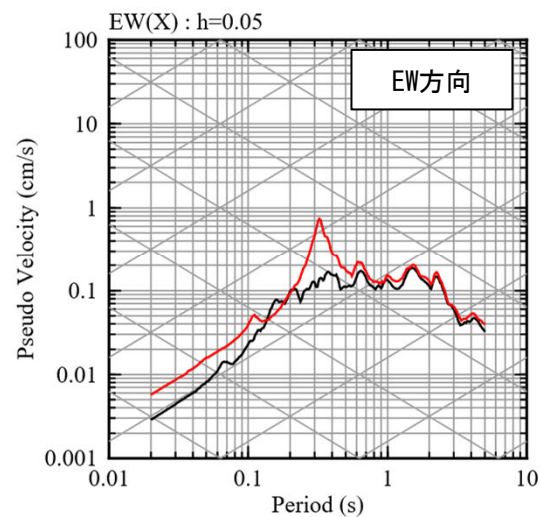
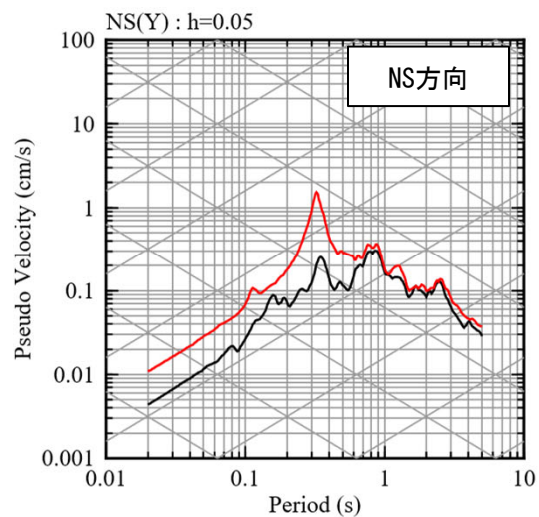
⑯ 熊本県熊本地方



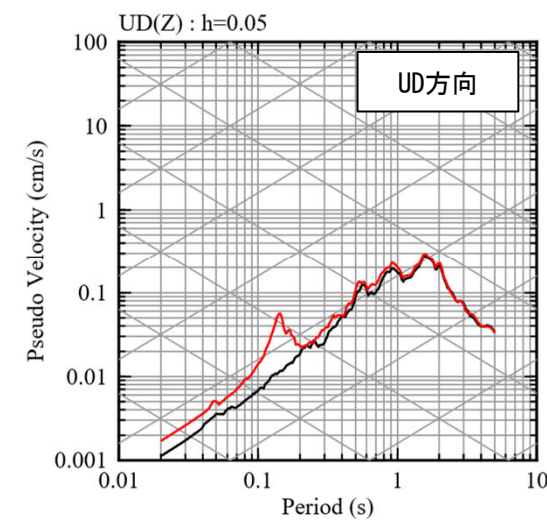
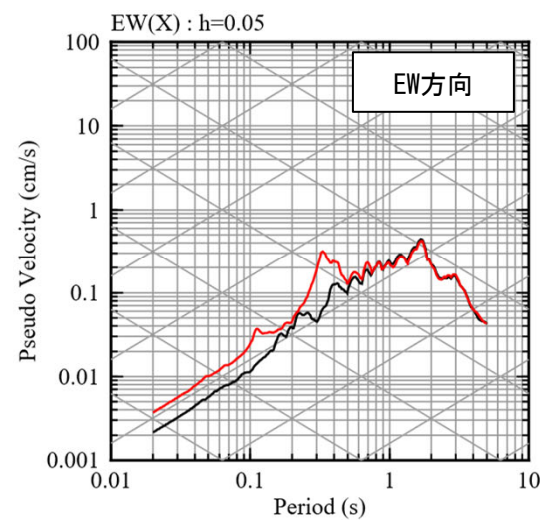
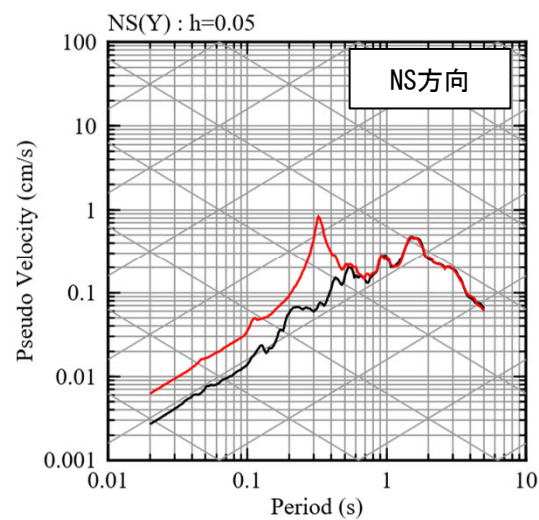
2.2 地下構造モデルの適用性確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

① 熊本県熊本地方



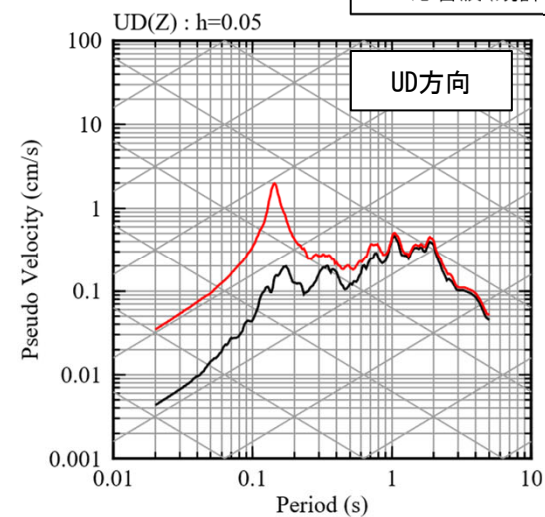
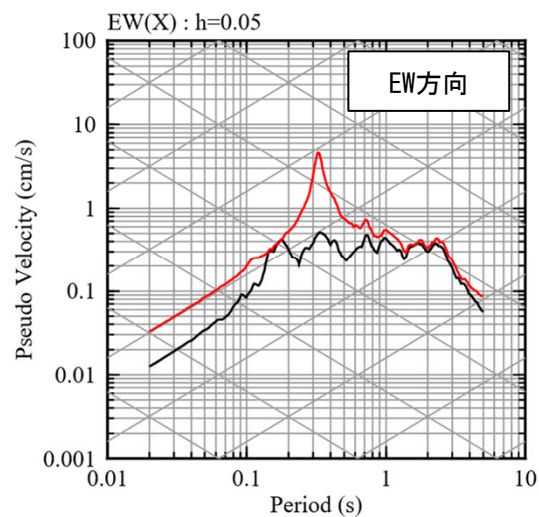
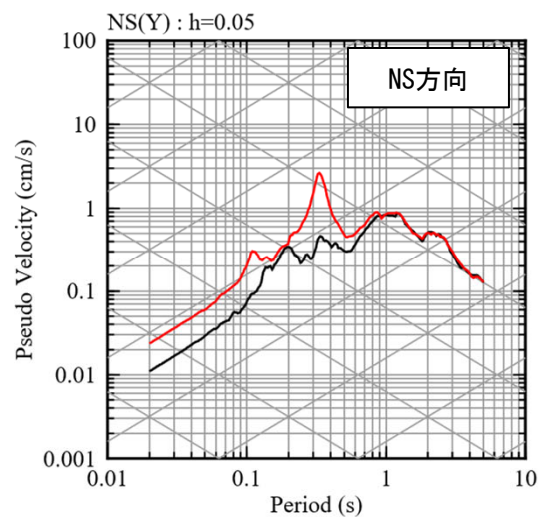
⑧ 熊本県阿蘇地方



2.2 地下構造モデルの適用性確認

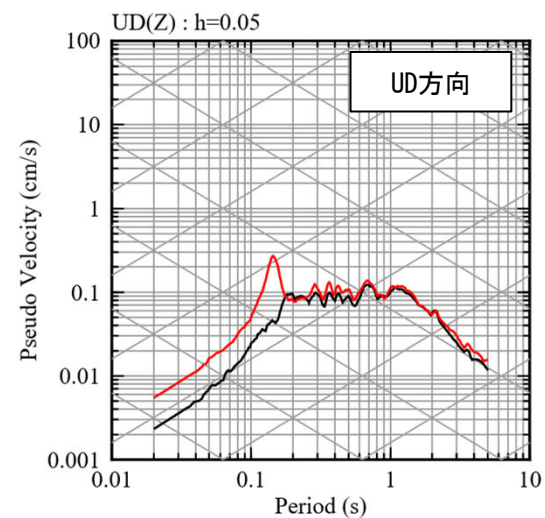
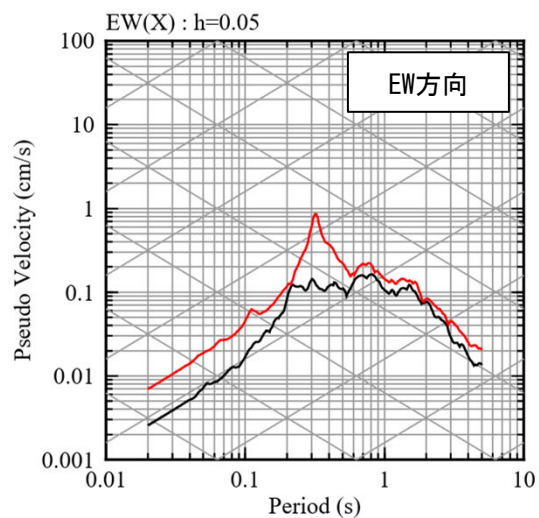
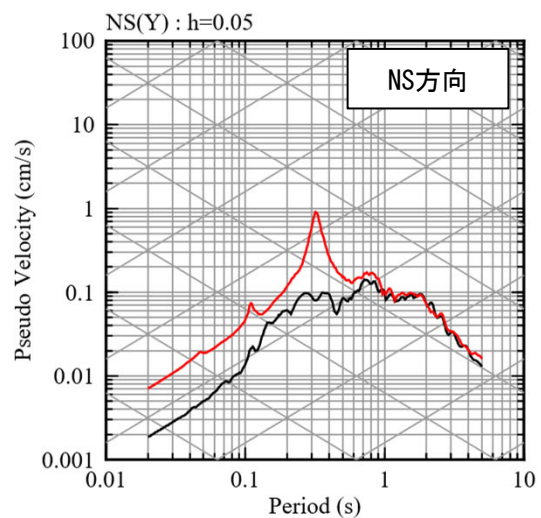
■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

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。

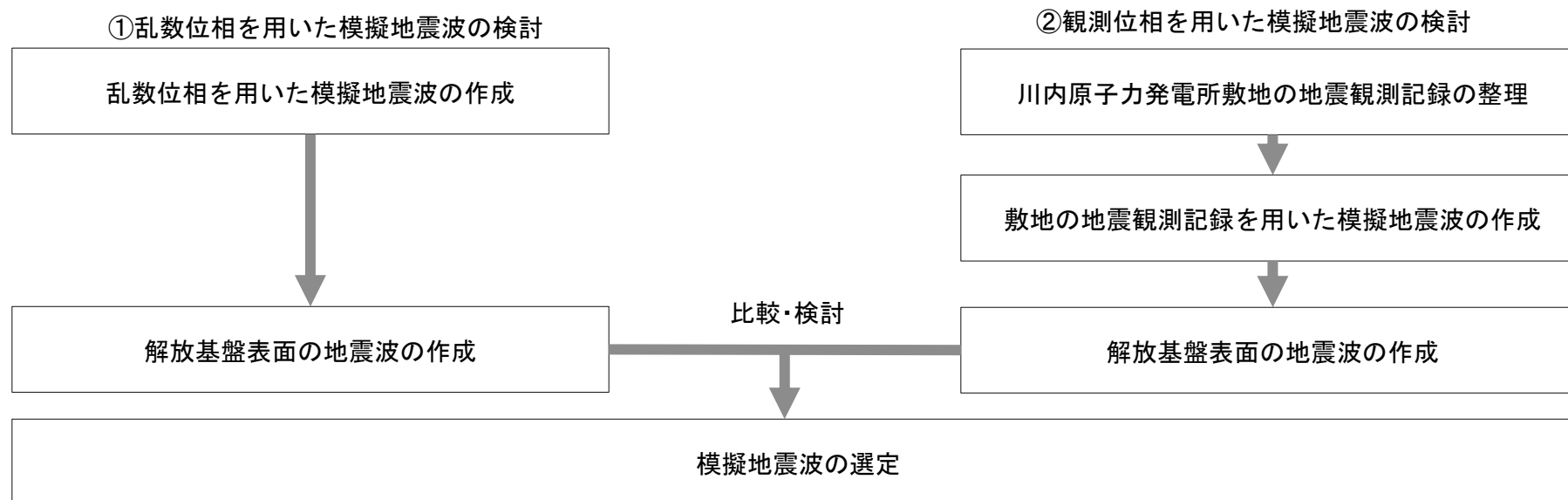
- 審査ガイドを踏まえて、以下の方針で模擬地震波を作成し、解放基盤表面における地震波を比較・検討した上で、「標準応答スペクトルを考慮した地震動」に用いる模擬地震波を設定する。

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。）

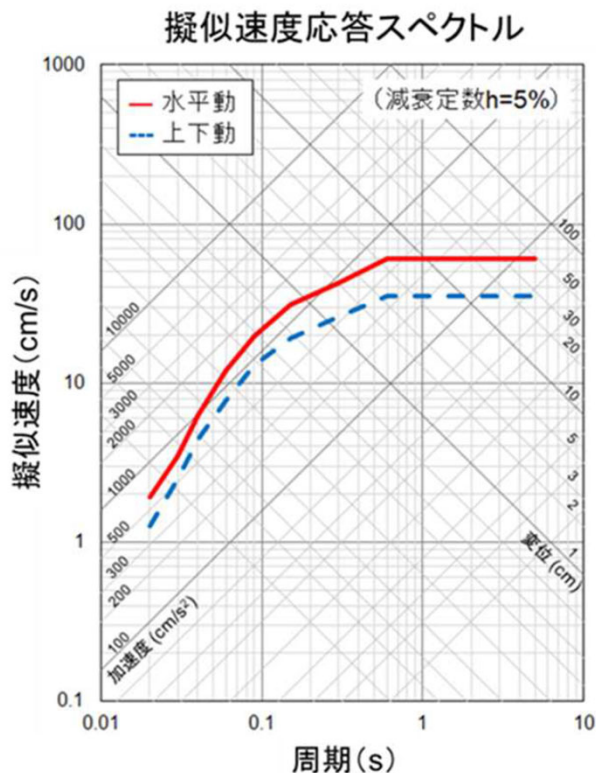
→川内原子力発電所敷地で得られた地震観測記録を整理し、実観測記録の位相を用いて模擬地震波を作成。



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
地震基盤相当面	-480m	-0.462	2150	4400	200
	-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 乱數位相を用いた模擬地震波の作成

■ 乱數位相を用いた模擬地震波の作成

- 地震基盤相当面での乱數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。

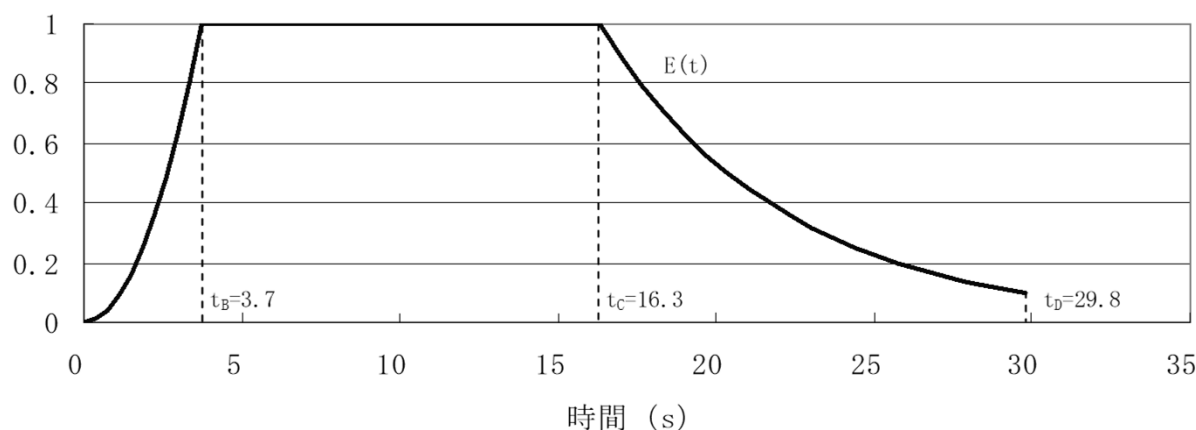
マグニチュード M:

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



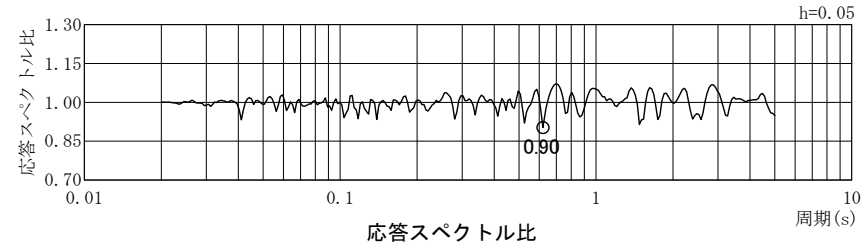
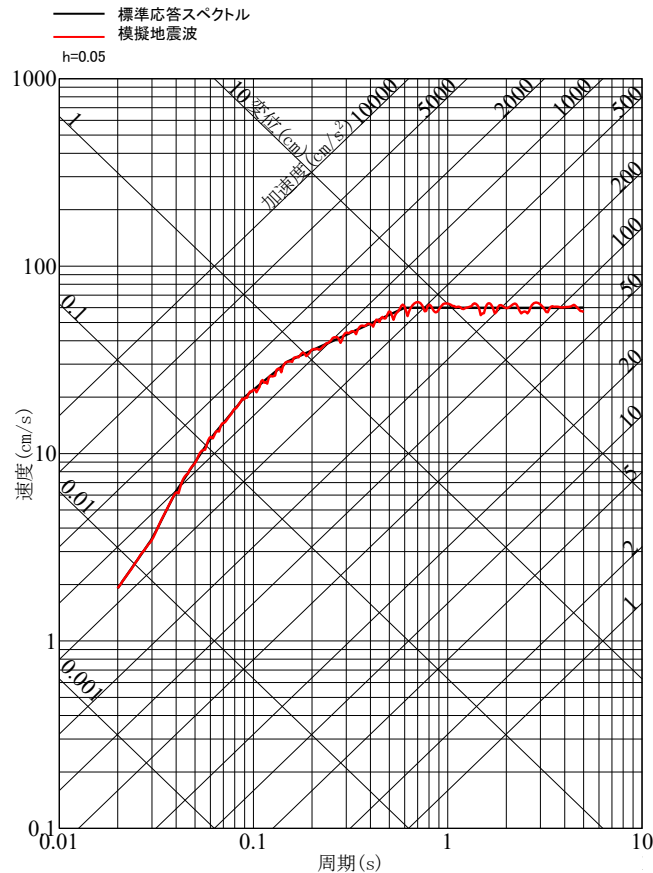
$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & (0 < t \leq t_B) \\ 1.0 & (t_B < t \leq t_C) \\ \frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C} e^{-\frac{\ln(0.1)}{t_D - t_C}(t - t_C)} & (t_C < t \leq t_D) \end{cases}$$

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

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
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

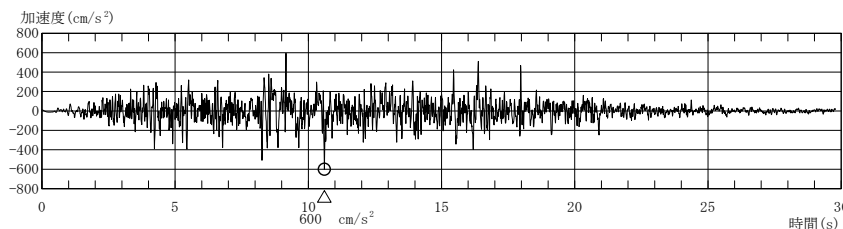
$$\textcircled{2} \quad SI \text{比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

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)

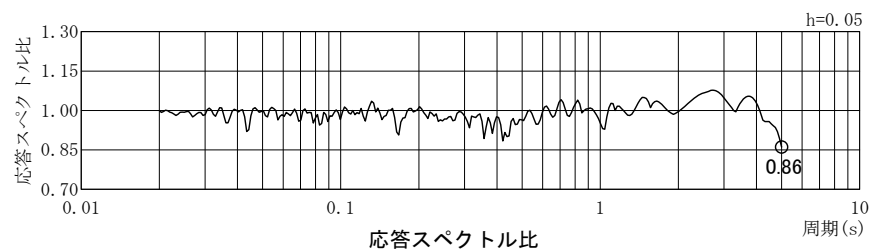
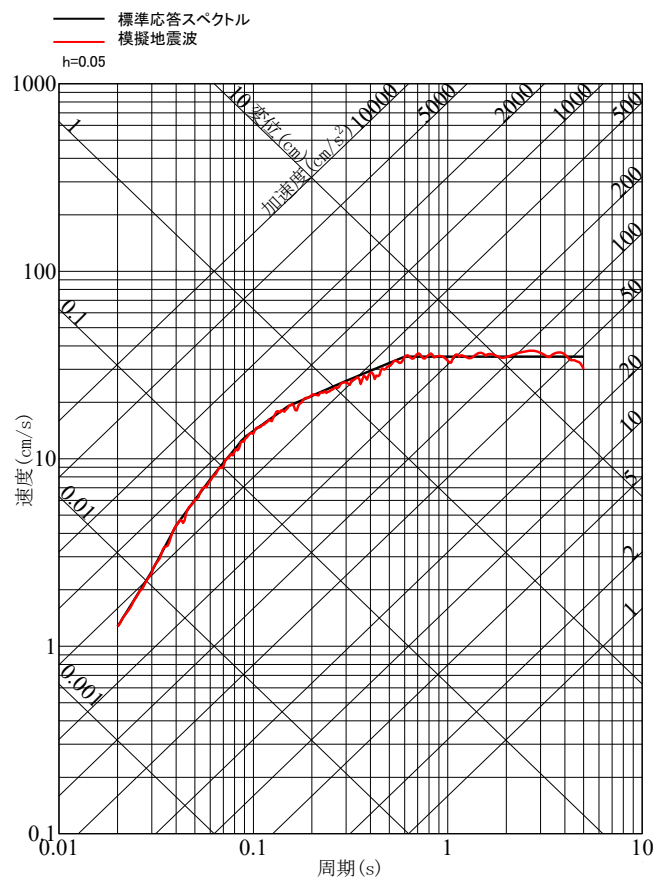
T : 固有周期 (s)



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
②SI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

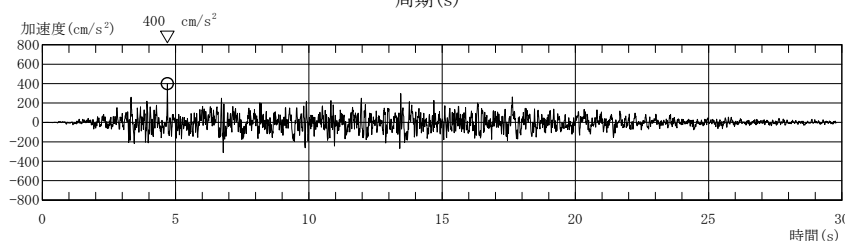
$$\textcircled{2} \quad SI \text{比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

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)

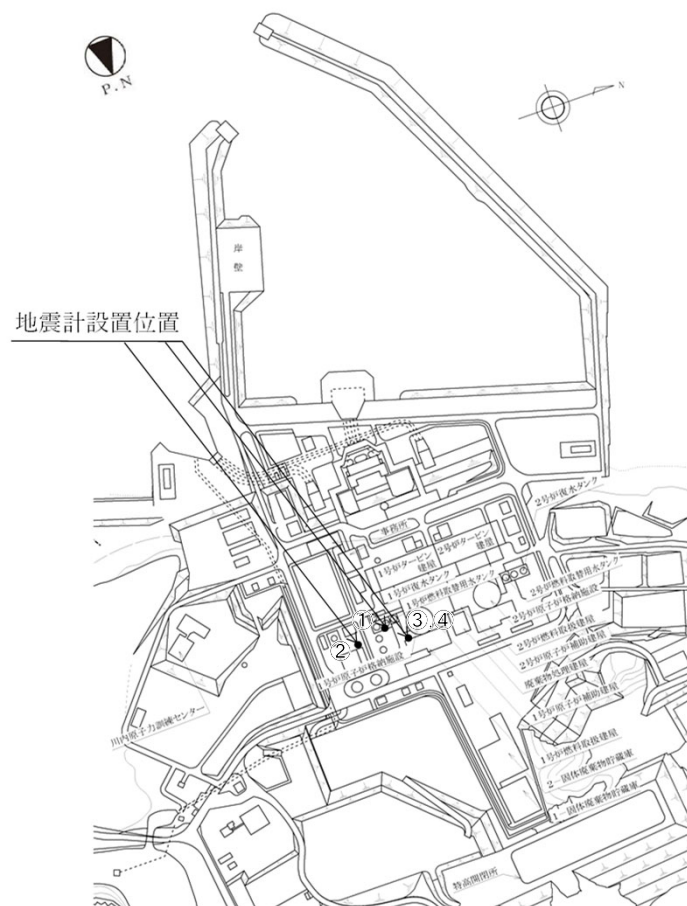
T : 固有周期 (s)



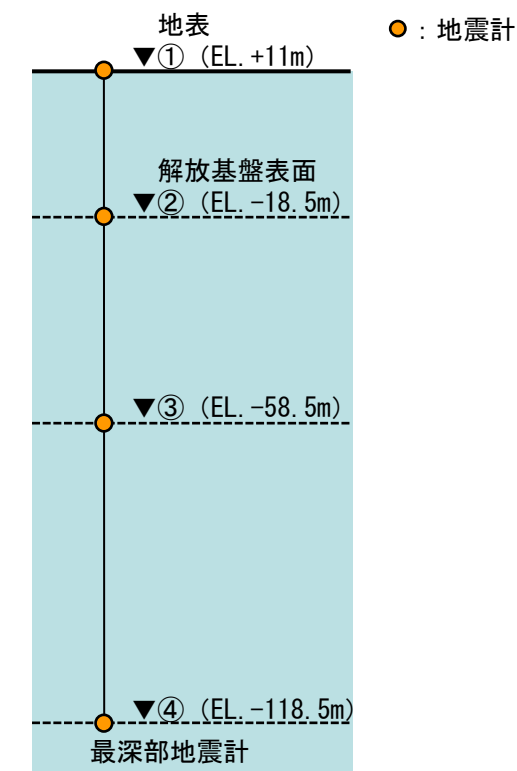
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 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

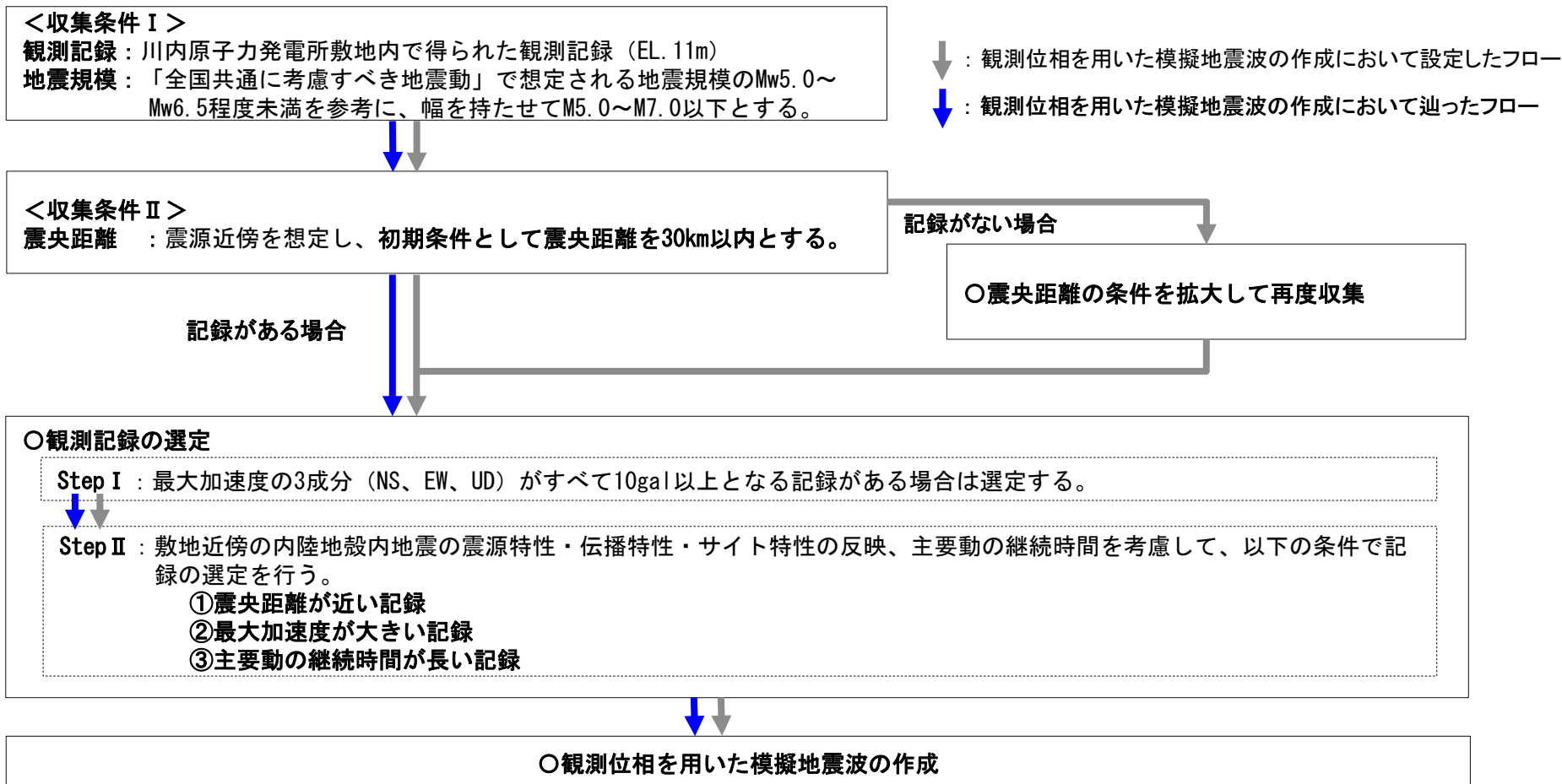


敷地の鉛直アレイ地震計断面位置

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。

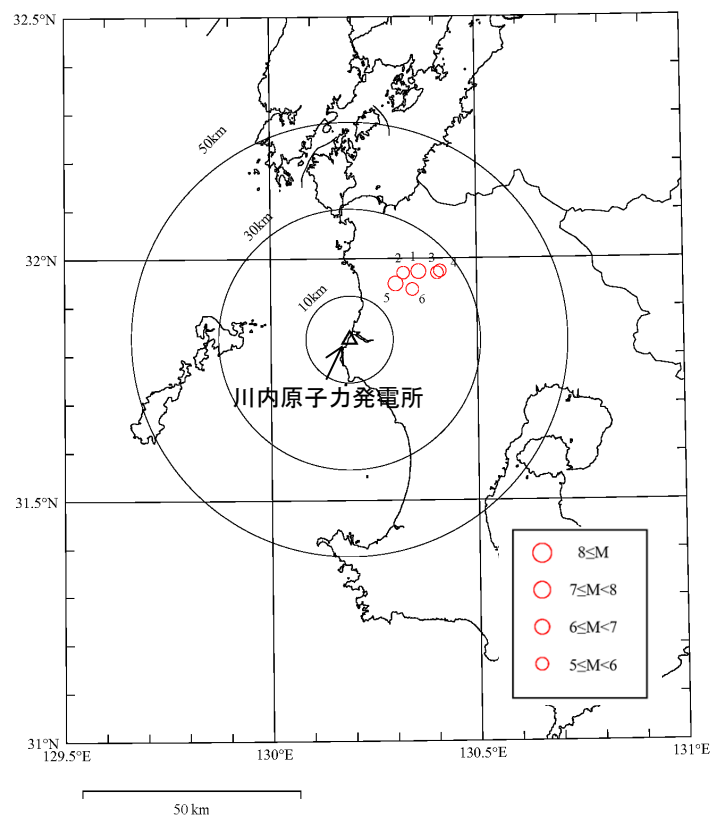


観測位相を用いた模擬地震波作成のための観測記録の収集・選定フロー

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.	発生日月時・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。

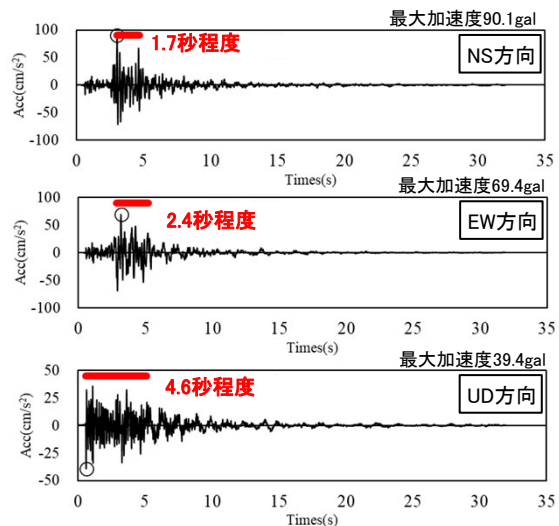
No.	地震名	地震規模 M	①震央距離 (km)	②最大加速度 (gal)	③主要動継続時間※ (秒)			実観測位相の選定
					NS	EW	UD	
1	1997年3月26日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 本震)	6.6	22.2	90.1	<u>1.7</u>	<u>2.4</u>	<u>4.6</u>	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が最も長い
2	1997年4月 3日 鹿児島県北西部の地震 (鹿児島県北西部地震 余震)	5.7	19.7	60.7	0.6	0.6	1.1	①震央距離が遠い ②最大加速度が小さい ③主要動の継続時間が短い
5	1997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

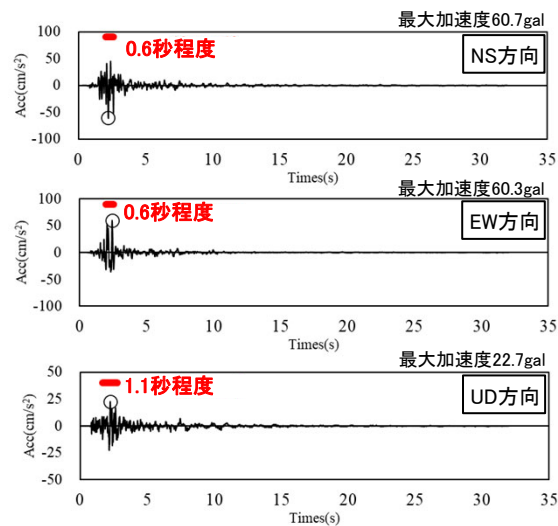
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

■ 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）

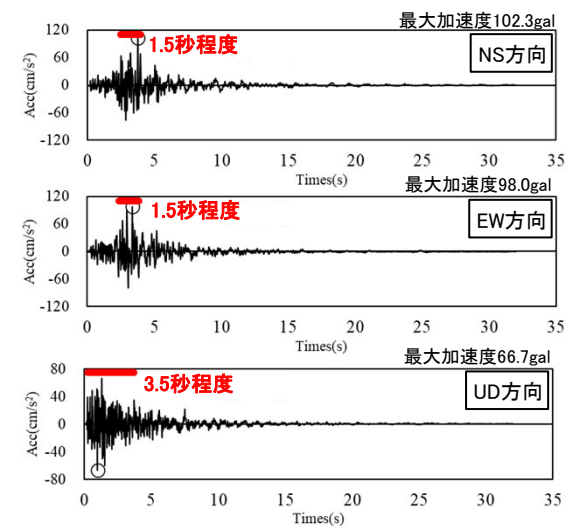
- 3地震の加速度時刻歴波形及び応答スペクトルを示す。なお、赤線は、主要動の継続時間を示す。



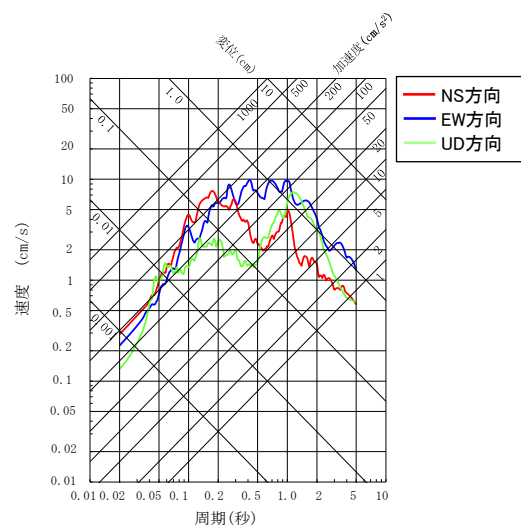
No.1 1997年03月26日鹿児島県北西部(M6.6)



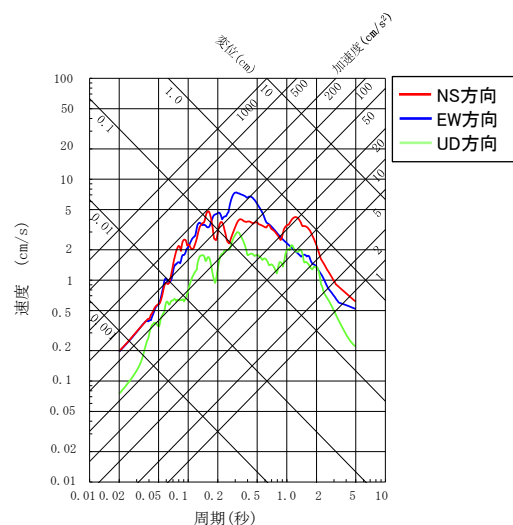
No.2 1997年04月03日鹿児島県北西部(M5.7)



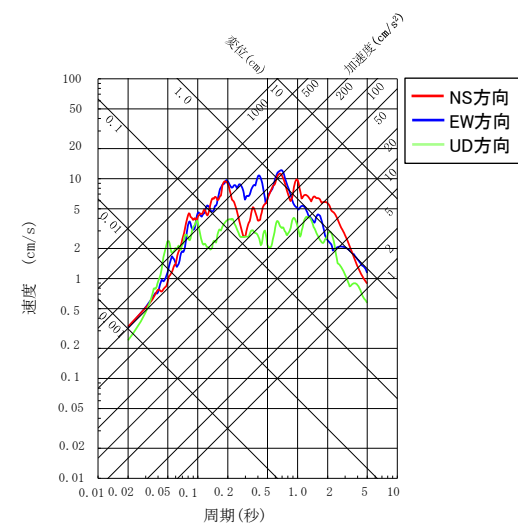
No.5 1997年05月13日鹿児島県北西部(M6.4)



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)

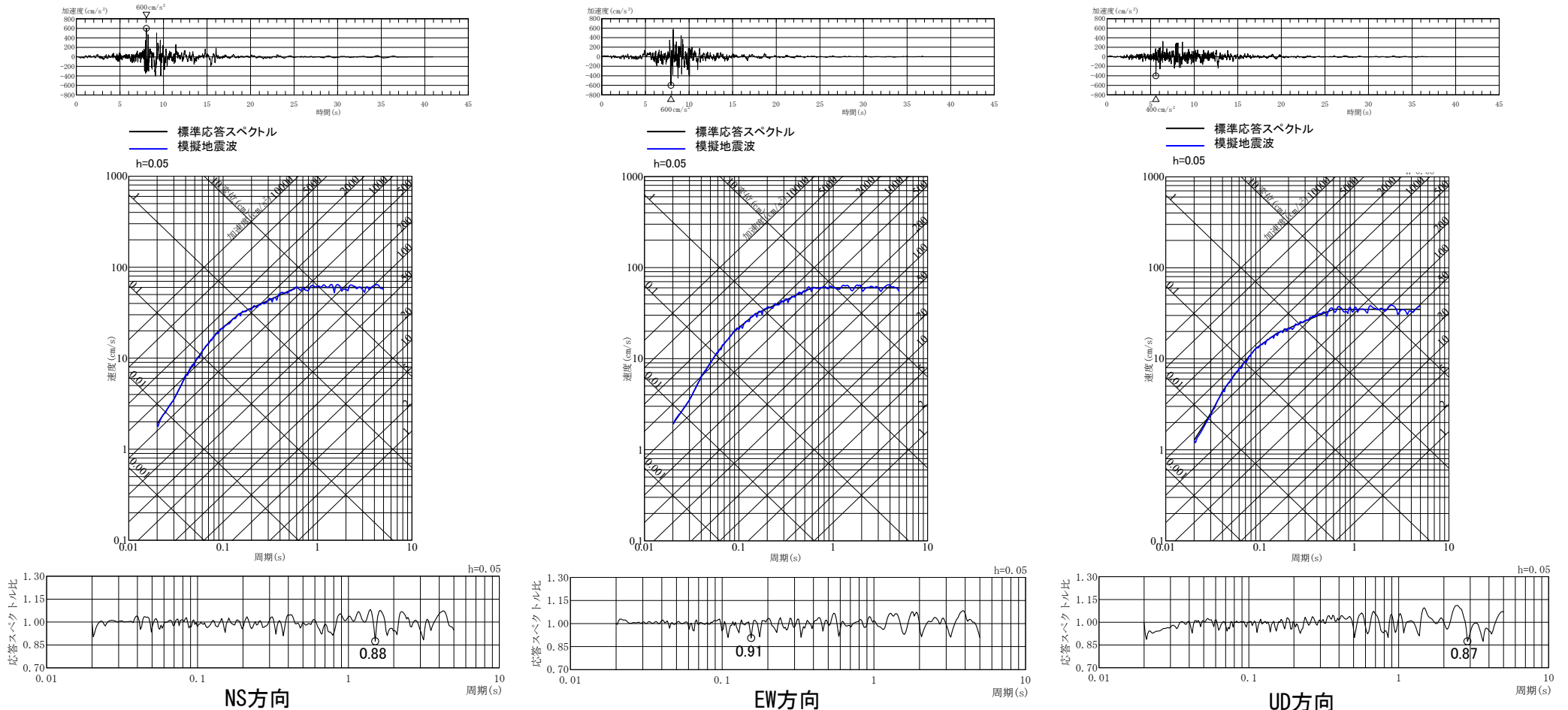


No.5 1997年05月13日
鹿児島県北西部(M6.4)

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。

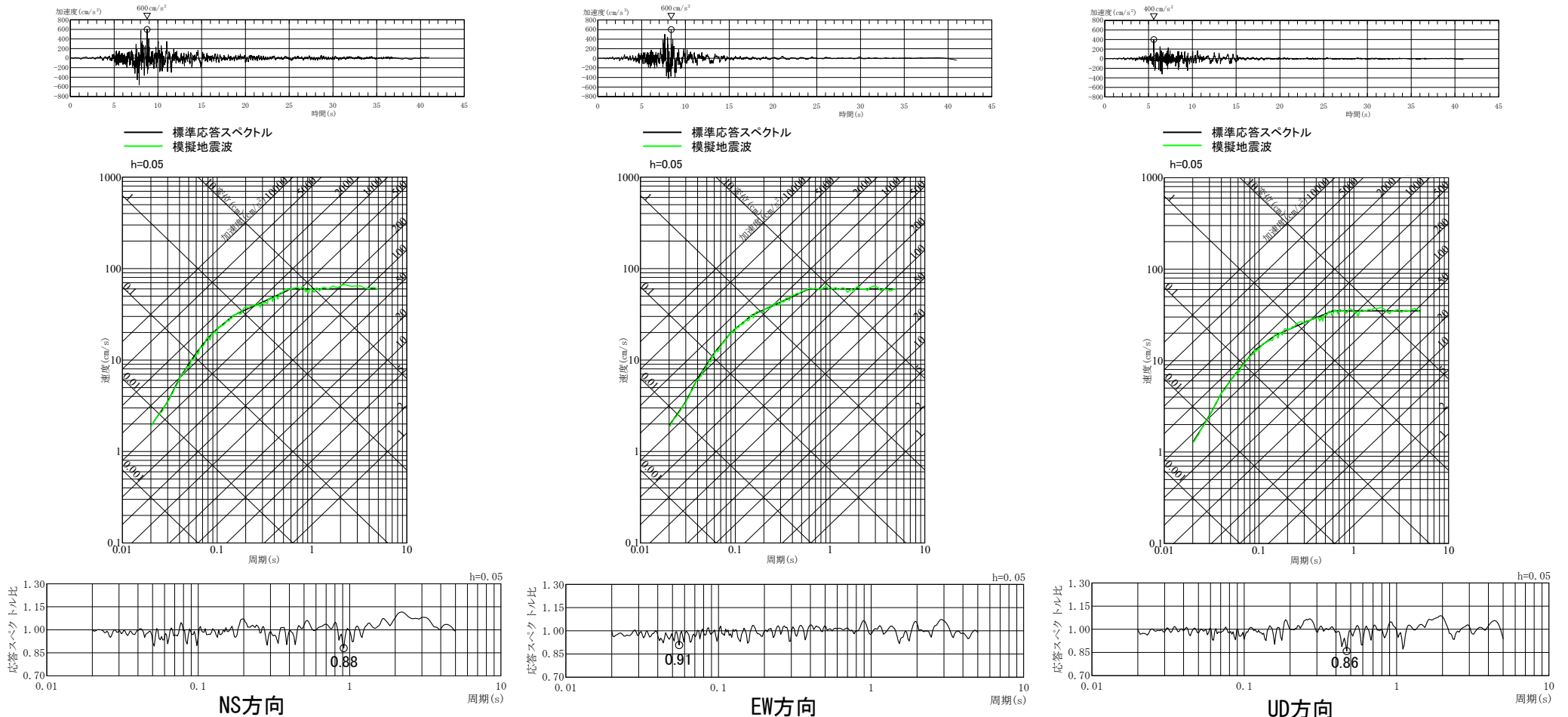


作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
①応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85	0.91 ≥ 0.85	0.87 ≥ 0.85
②SI比	1.00 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00

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。

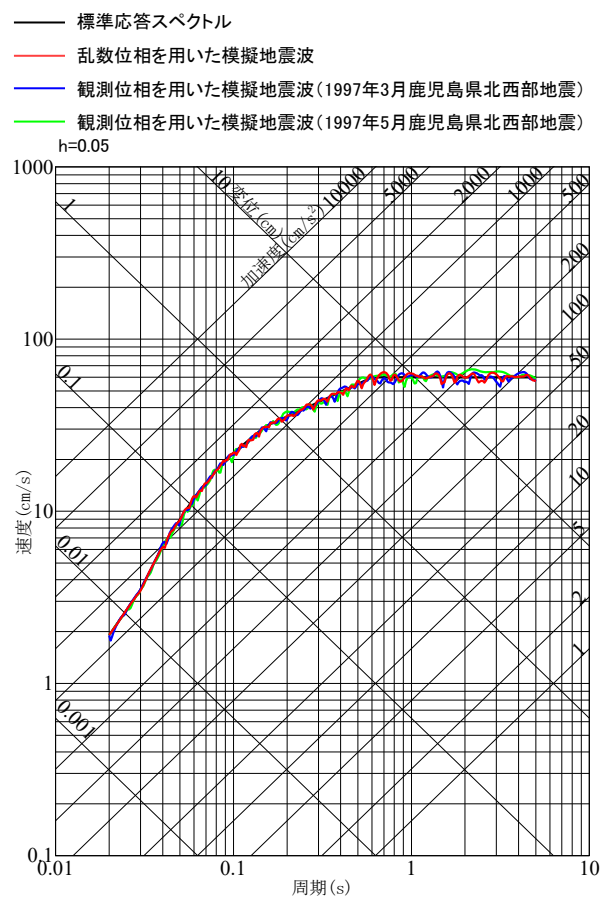


作成結果	NS方向	EW方向	UD方向
①応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85	0.91 ≥ 0.85	0.86 ≥ 0.85
②SI比	1.03 ≥ 1.00	1.00 ≥ 1.00	1.01 ≥ 1.00

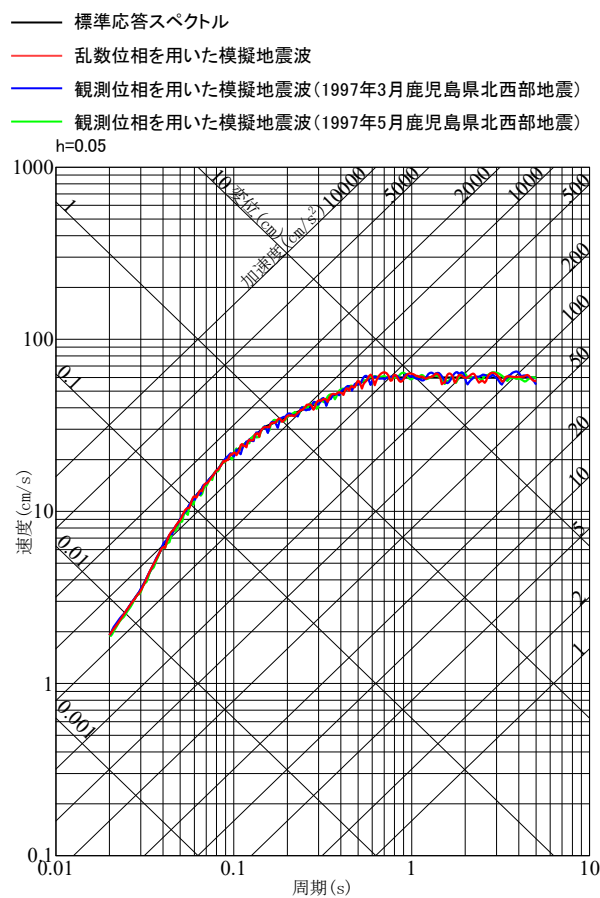
3.3 観測位相を用いた模擬地震波の作成

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

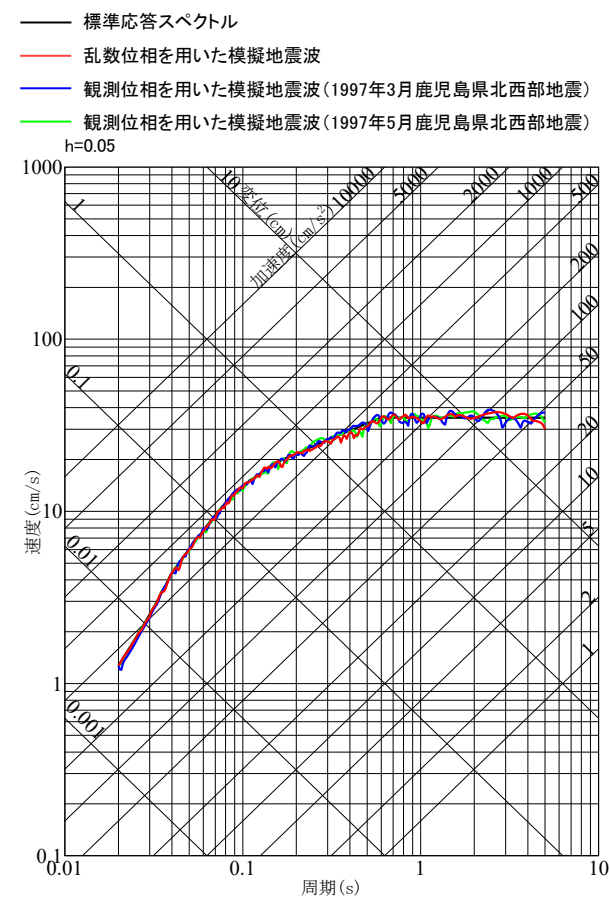
- 乱數位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波の応答スペクトルの比較を以下に示す。
- 両者の応答スペクトルは、標準応答スペクトルに適合するよう作成していることから、有意な差は見られない。



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。

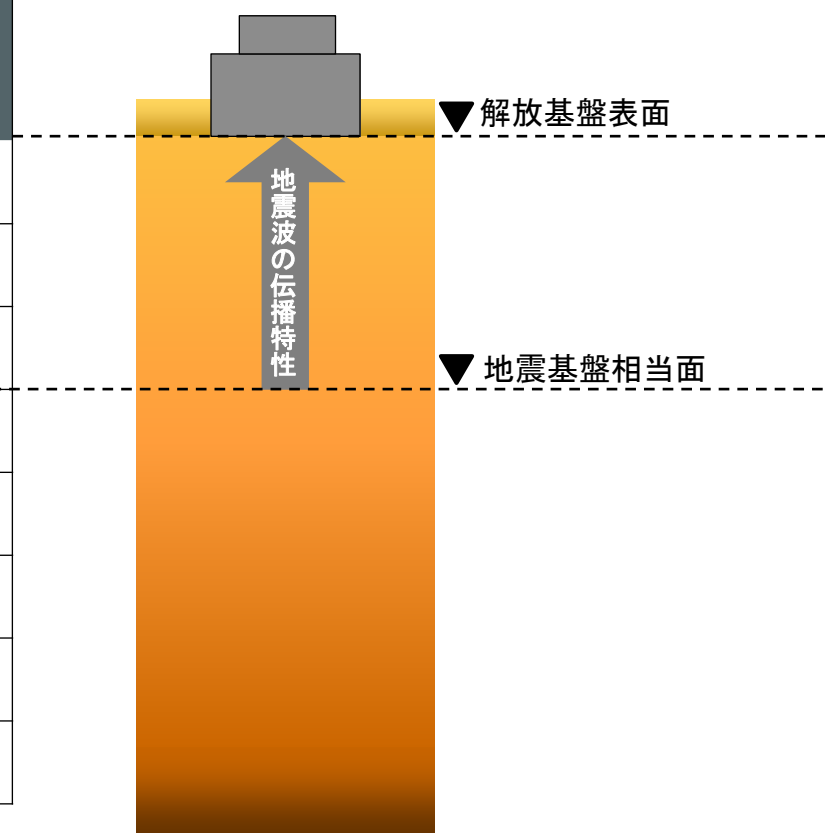
3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 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



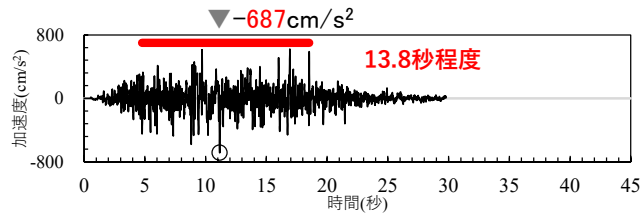
標準応答スペクトルを考慮した地震動の評価のイメージ

3.4 解放基盤表面の地震波の比較

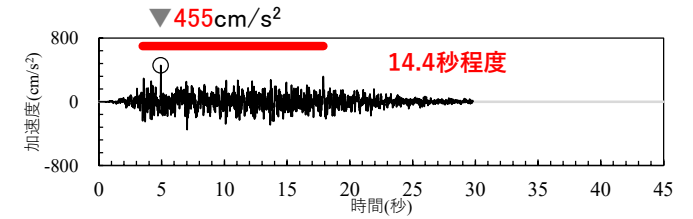
■ 解放基盤表面の地震波の比較：①時刻歴波形

- 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

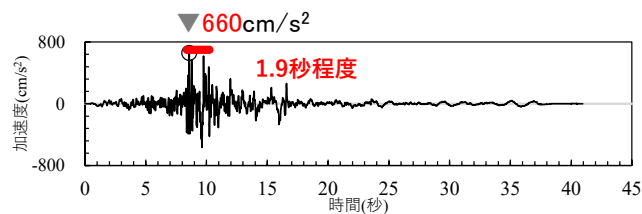


水平方向

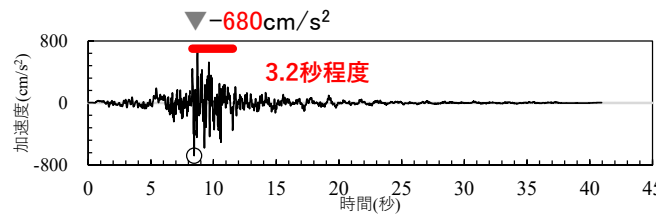


鉛直方向

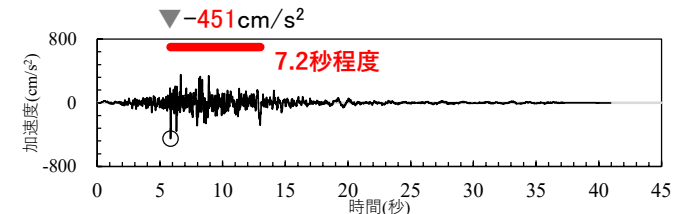
● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波(1997年3月鹿児島県北部地震)



NS方向

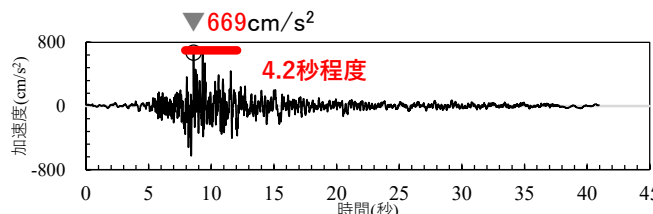


EW方向

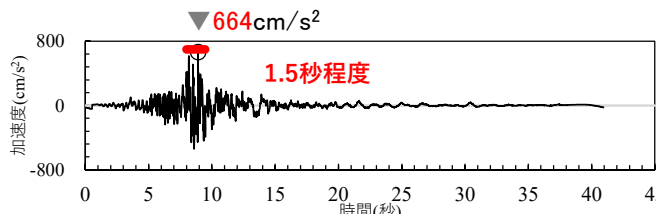


UD方向

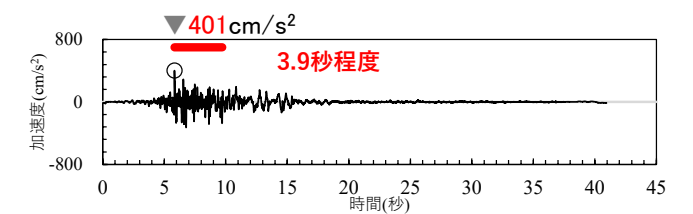
● 観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波(1997年5月鹿児島県北部地震)



NS方向



EW方向

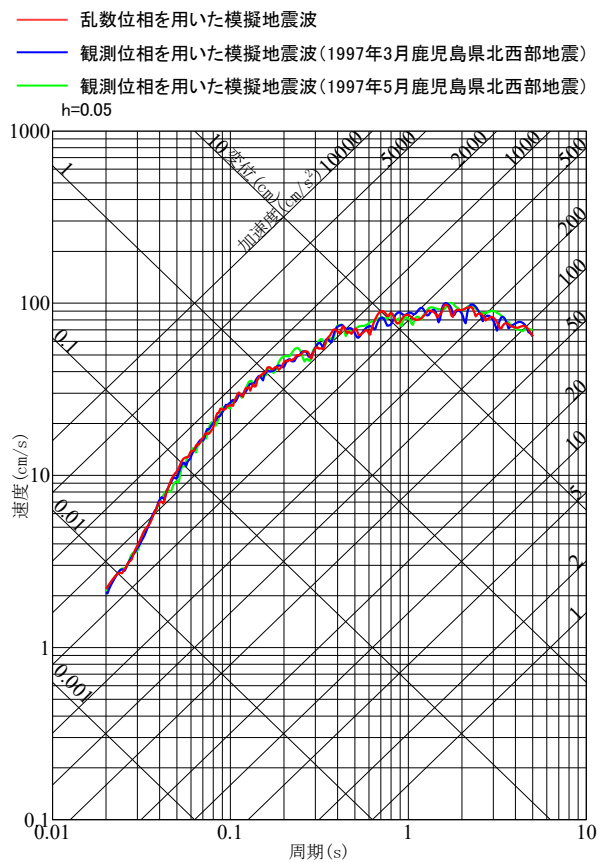


UD方向

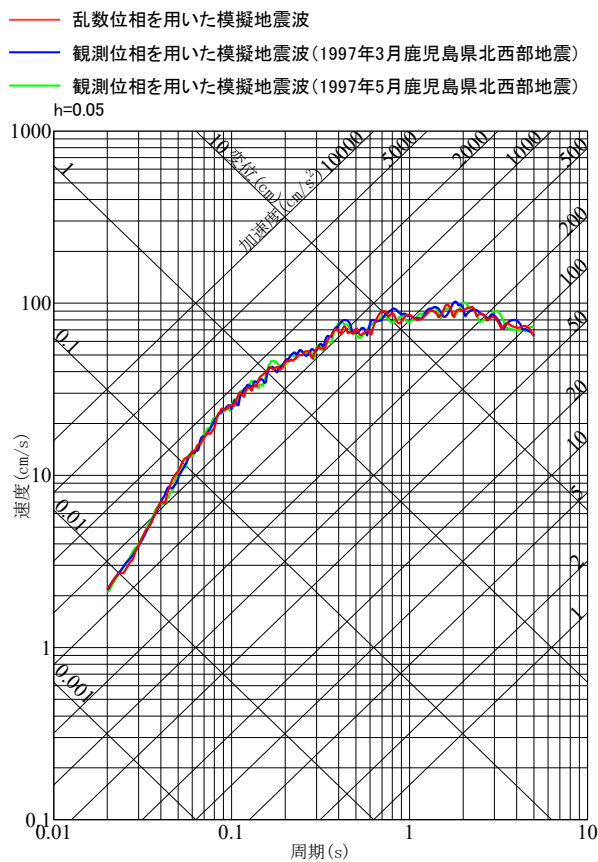
3.4 解放基盤表面の地震波の比較

■ 解放基盤表面の地震波の比較：②応答スペクトル

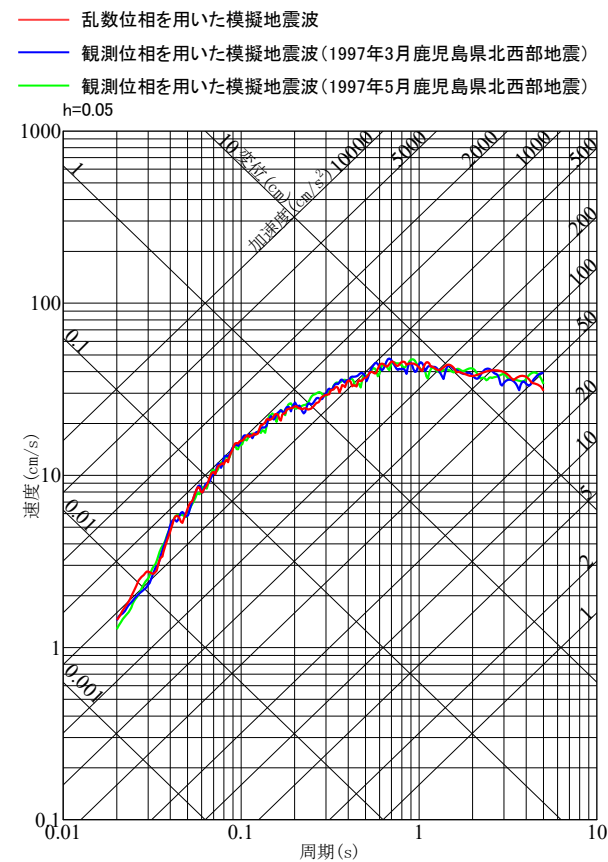
- 乱数位相を用いた模擬地震波及び観測位相を用いた模擬地震波による解放基盤表面の地震波の応答スペクトルを以下に示す。
- 解放基盤表面での両者の応答スペクトルは同程度であり、位相の違いによる影響がないことを確認。



NS方向



EW方向



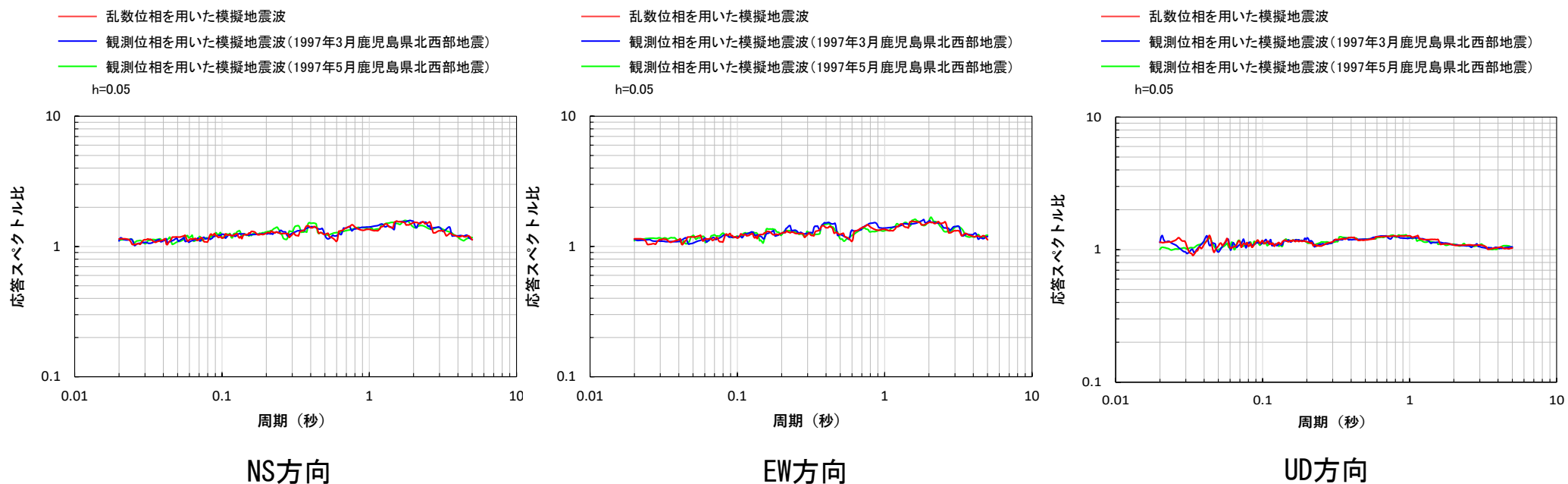
UD方向

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。



応答スペクトルの比(解放基盤表面/地震基盤相当面)

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

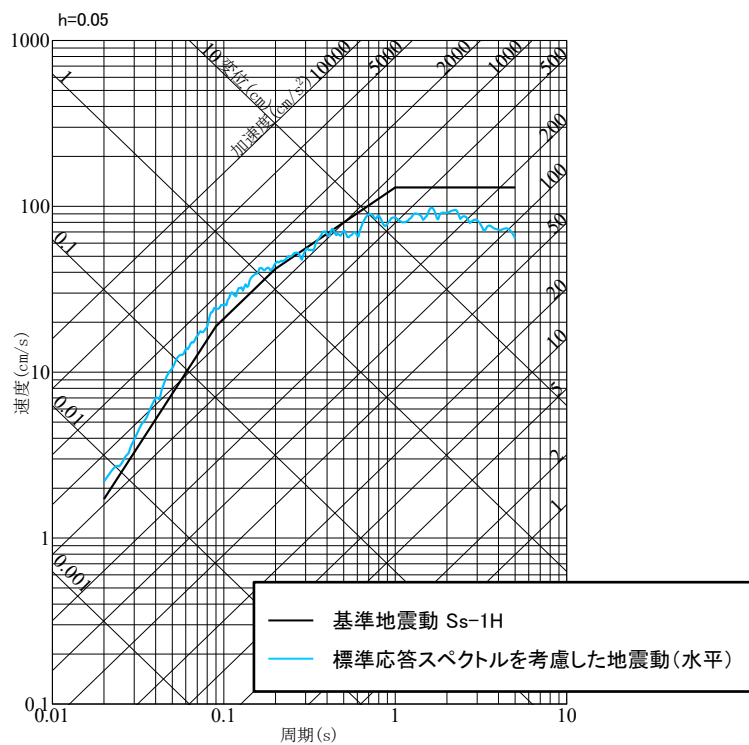
比較・検討項目	着目点	比較結果
①時刻歴波形	最大加速度の大きさ	観測位相を用いた模擬地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波の方が大きい
	強震部の継続時間の長さ	観測位相を用いた模擬地震波よりも乱数位相を用いた模擬地震波の方が長い
②応答スペクトル	周期ごとの応答値の大きさ	乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度
	周期ごとの応答値の比の大きさ	乱数位相を用いた模擬地震波と観測位相を用いた模擬地震波が同程度

4. 基準地震動の策定

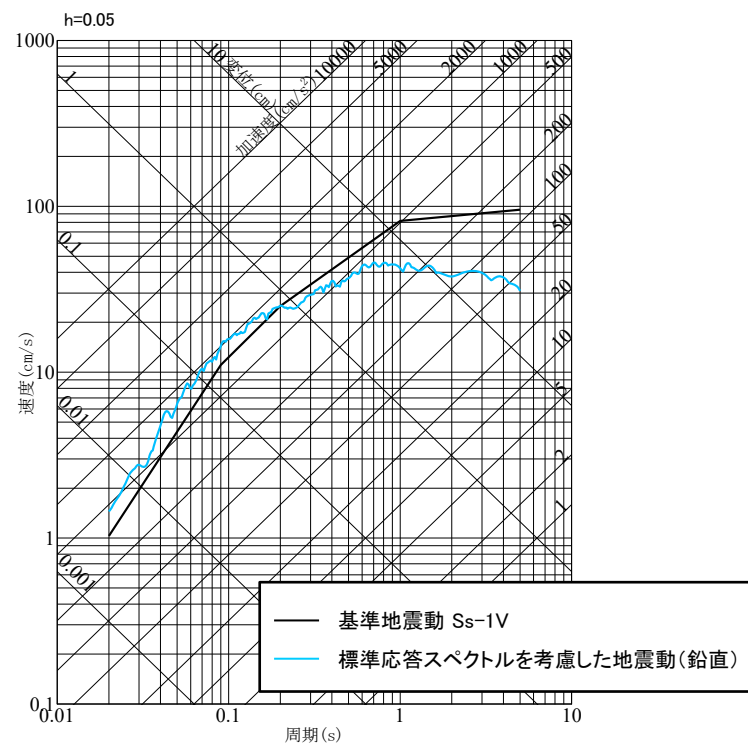
4. 基準地震動の策定

■ 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 S_s-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 S_s-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 S_s-3 として策定する。



水平方向



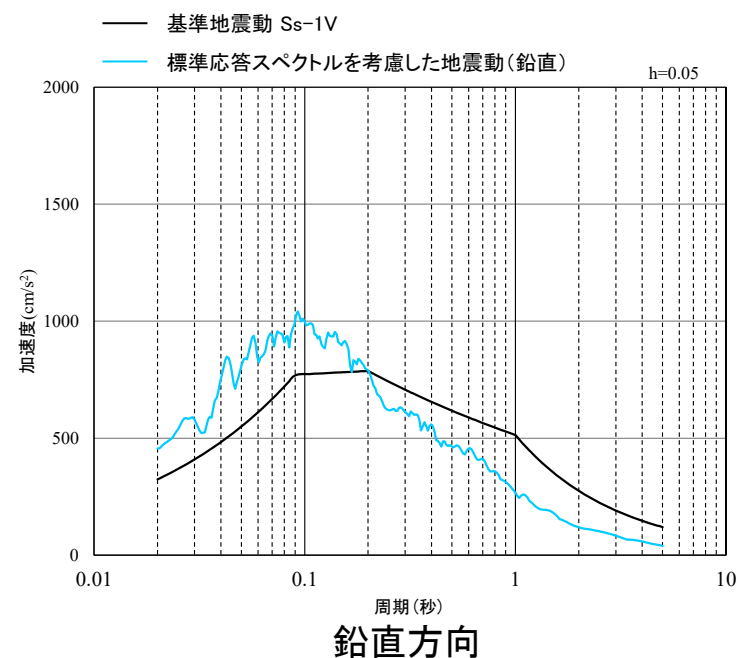
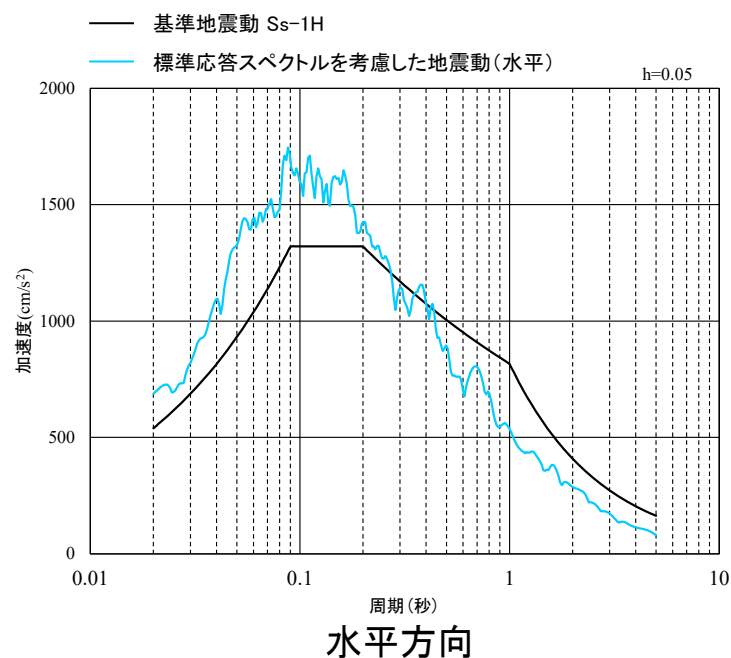
鉛直方向

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

4. 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。

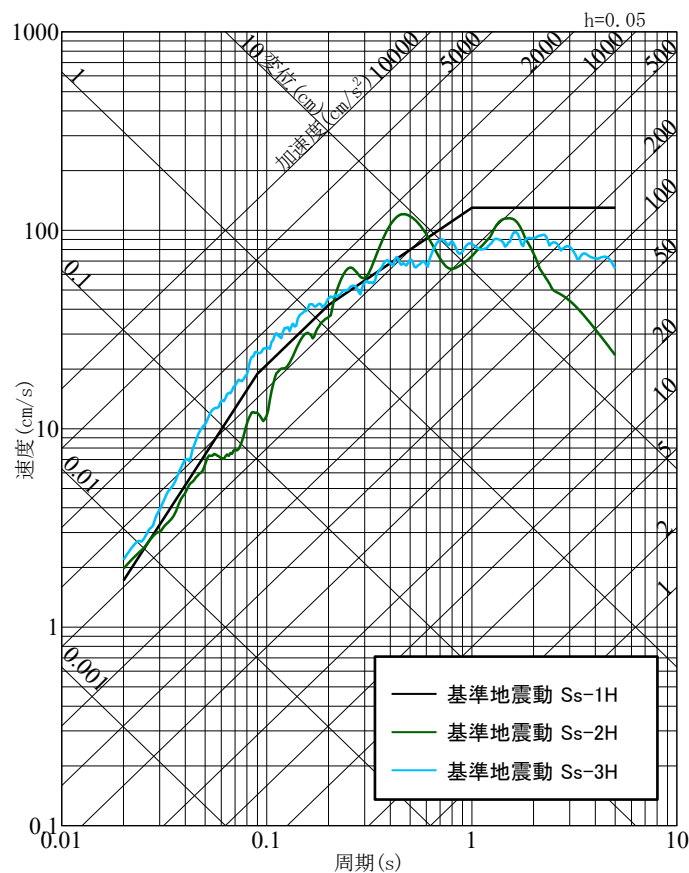


標準応答スペクトルを考慮した地震動と基準地震動Ss-1との応答スペクトルの比較

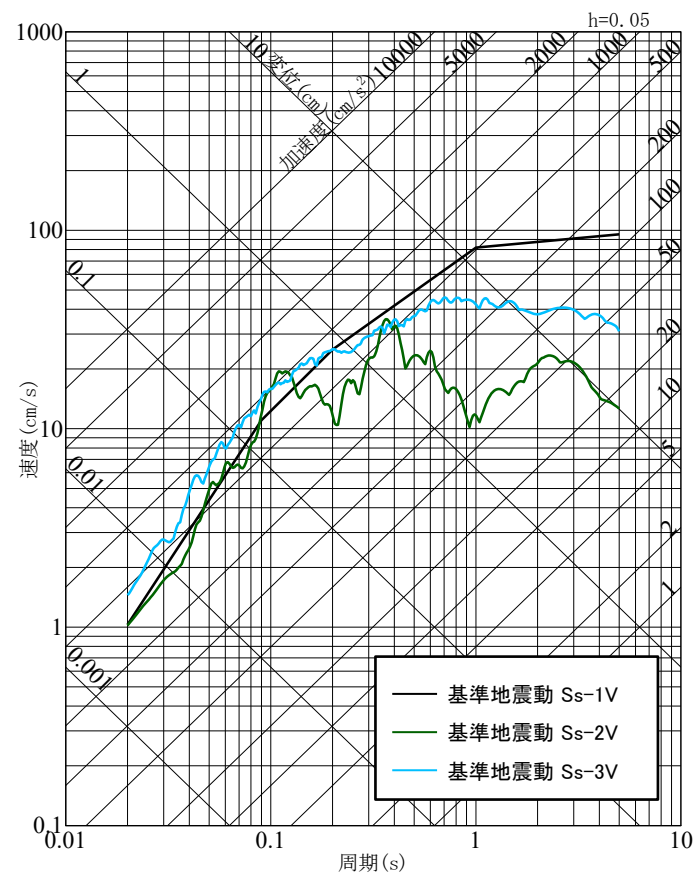
4. 基準地震動の策定

■ 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

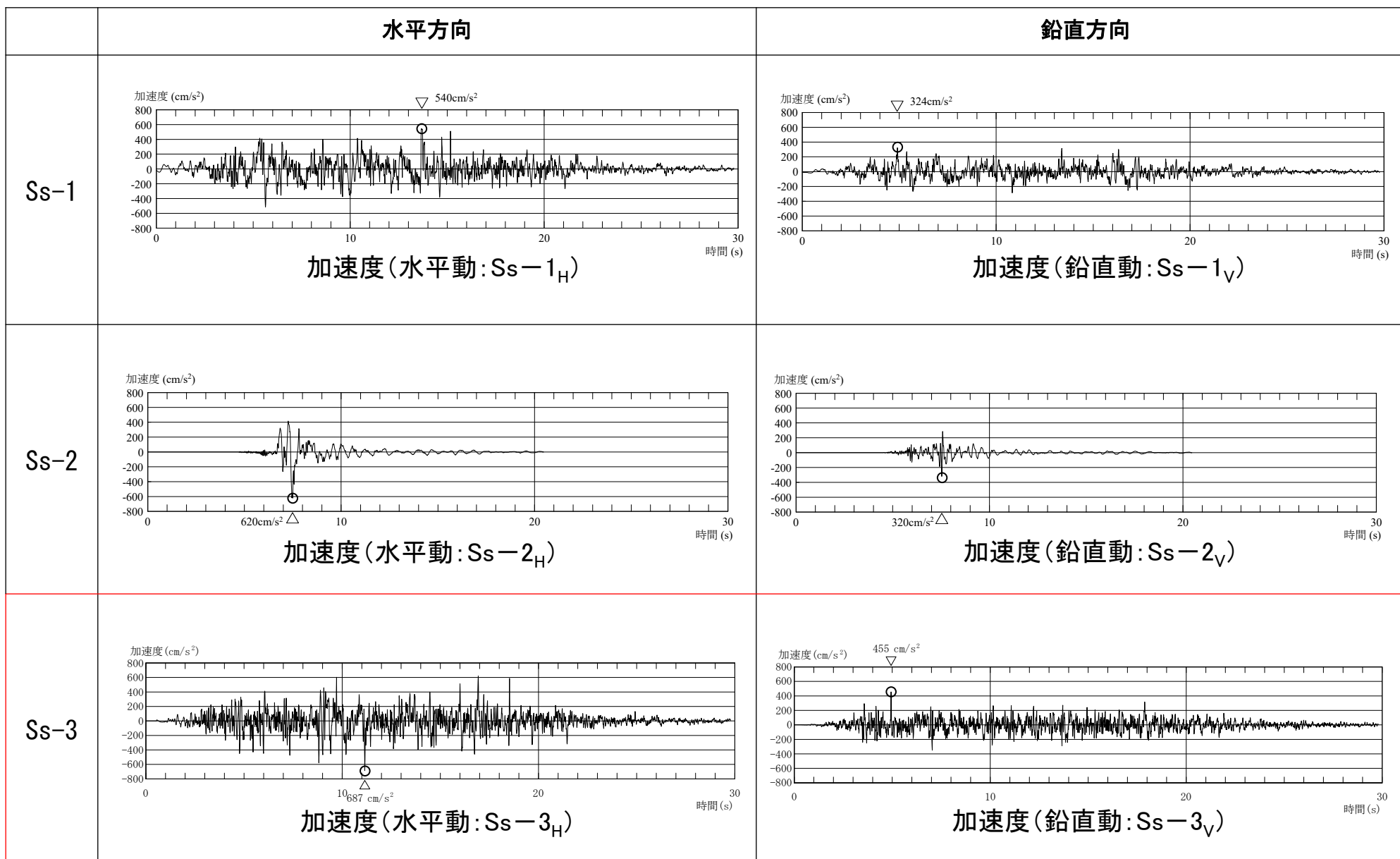


鉛直方向

基準地震動の応答スペクトル

4. 基準地震動の策定

■ 基準地震動の加速度時刻歴波形



4. 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/s²)

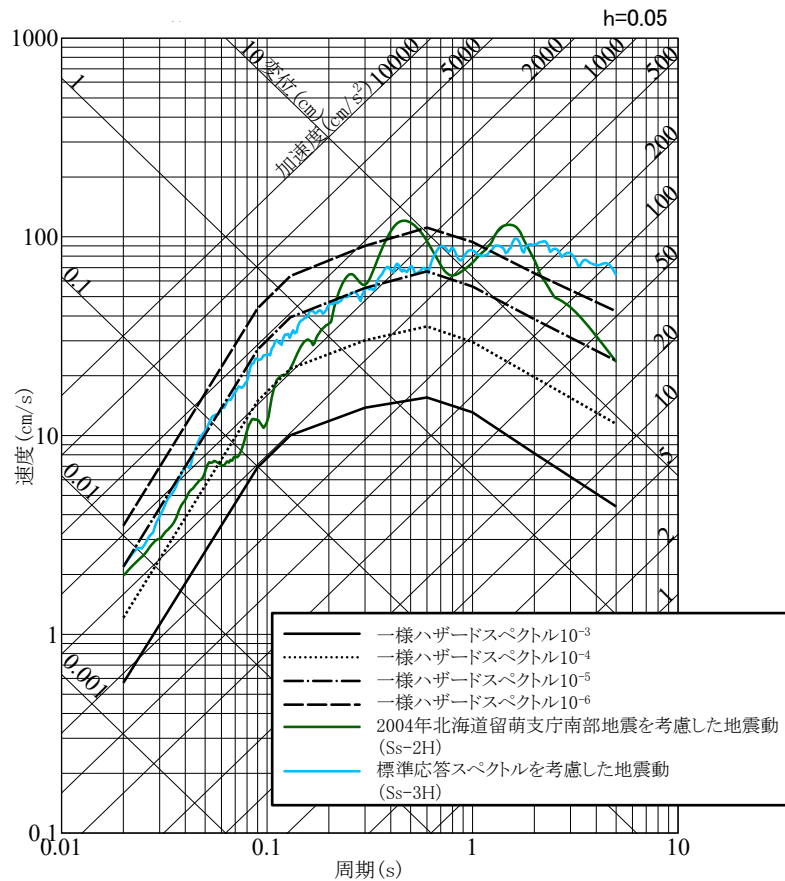
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540	324
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
全国共通に考慮すべき地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-2	620	320
	標準応答スペクトル	Ss-3	687	455

5. 超過確率の参照

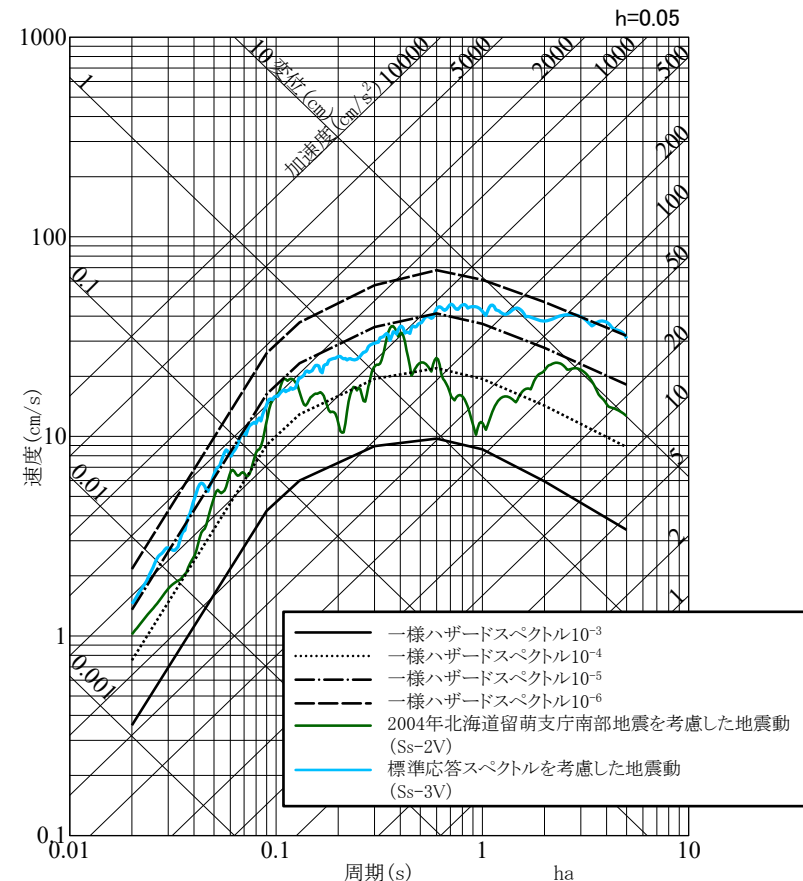
5. 超過確率の参照

■ 「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。
(標準応答スペクトルを考慮した地震動(Ss-3)の年超過確率も $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 程度)
- なお、既許可の一様ハザードスペクトルを使用することの妥当性確認として、既許可以降に発生した2016年熊本地震(M7.3)等の地震活動による既許可の確率論的地震ハザード評価への影響を確認。(補足②)



水平方向

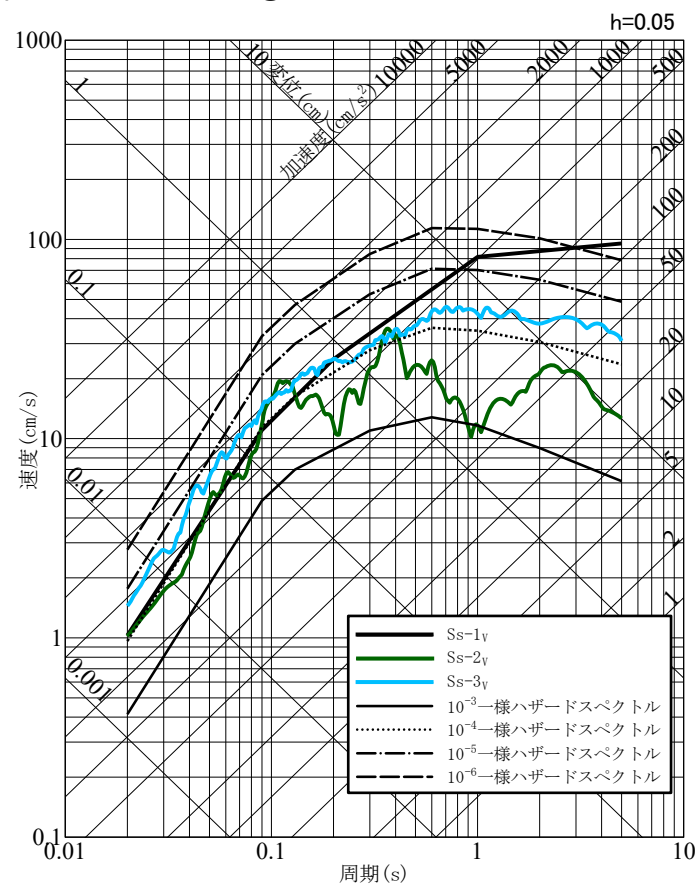
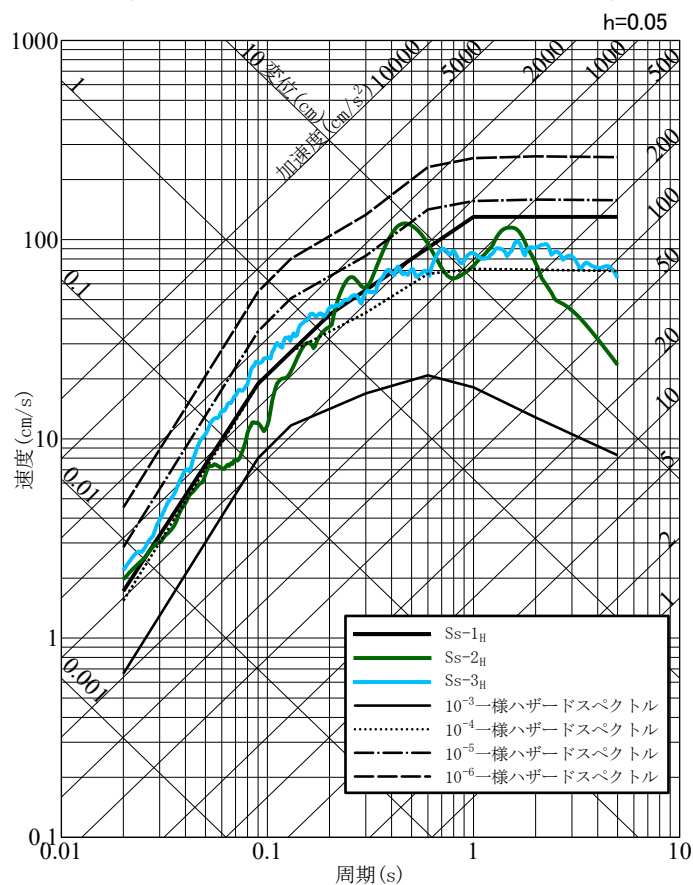



鉛直方向

5. 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} ~ 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。
(標準応答スペクトルを考慮した地震動 (Ss-3) の年超過確率も 10^{-4} ~ 10^{-5} 程度)
- なお、既許可の一様ハザードスペクトルを使用することの妥当性確認として、既許可以降に発生した2016年熊本地震 (M7.3) 等の地震活動による既許可の確率論的地震ハザード評価への影響を確認。(補足②)





6. まとめ

6. まとめ

＜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は、既許可モデルを用いる。
 - － 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。
- 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
 - － 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。

6. 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。

6. まとめ

<今後の取り組み>

- 以上の通り、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価では既許可モデルを用いることとした。

- 今後も、更なる安全性・信頼性の向上を図ることを目的に、最新の技術的知見の収集・分析・評価を実施する。
 - 広域地震観測〔継続〕
 - 敷地内地下構造の把握
 - ・ 敷地内鉛直アレイ地震観測〔継続〕
 - ・ 減衰測定に用いたボーリング孔における地震計増設（EL. -200m）
 - ・ 大深度ボーリング及び地下深部の地震観測の実施についても検討

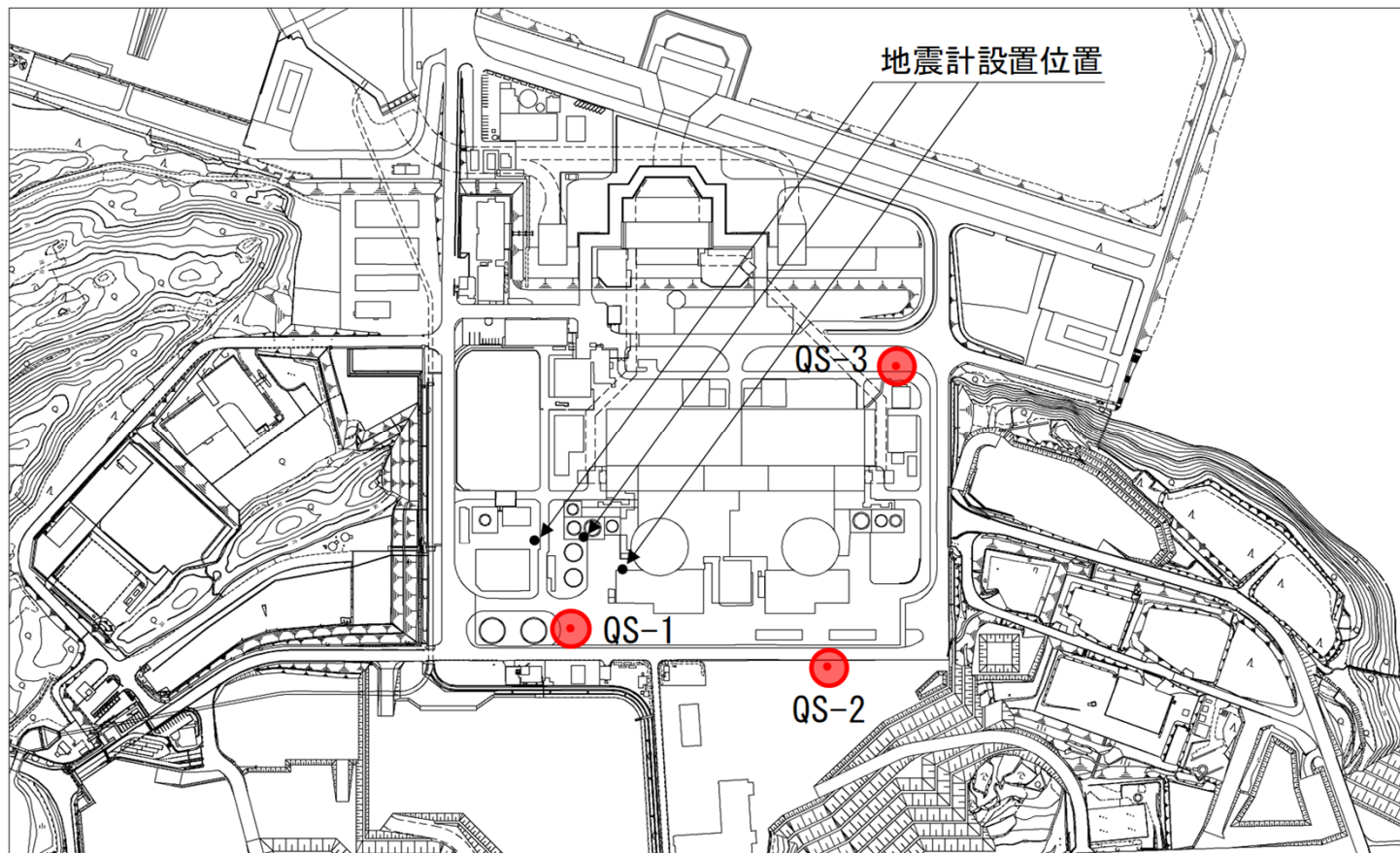


【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

■ 追加ボーリング調査位置

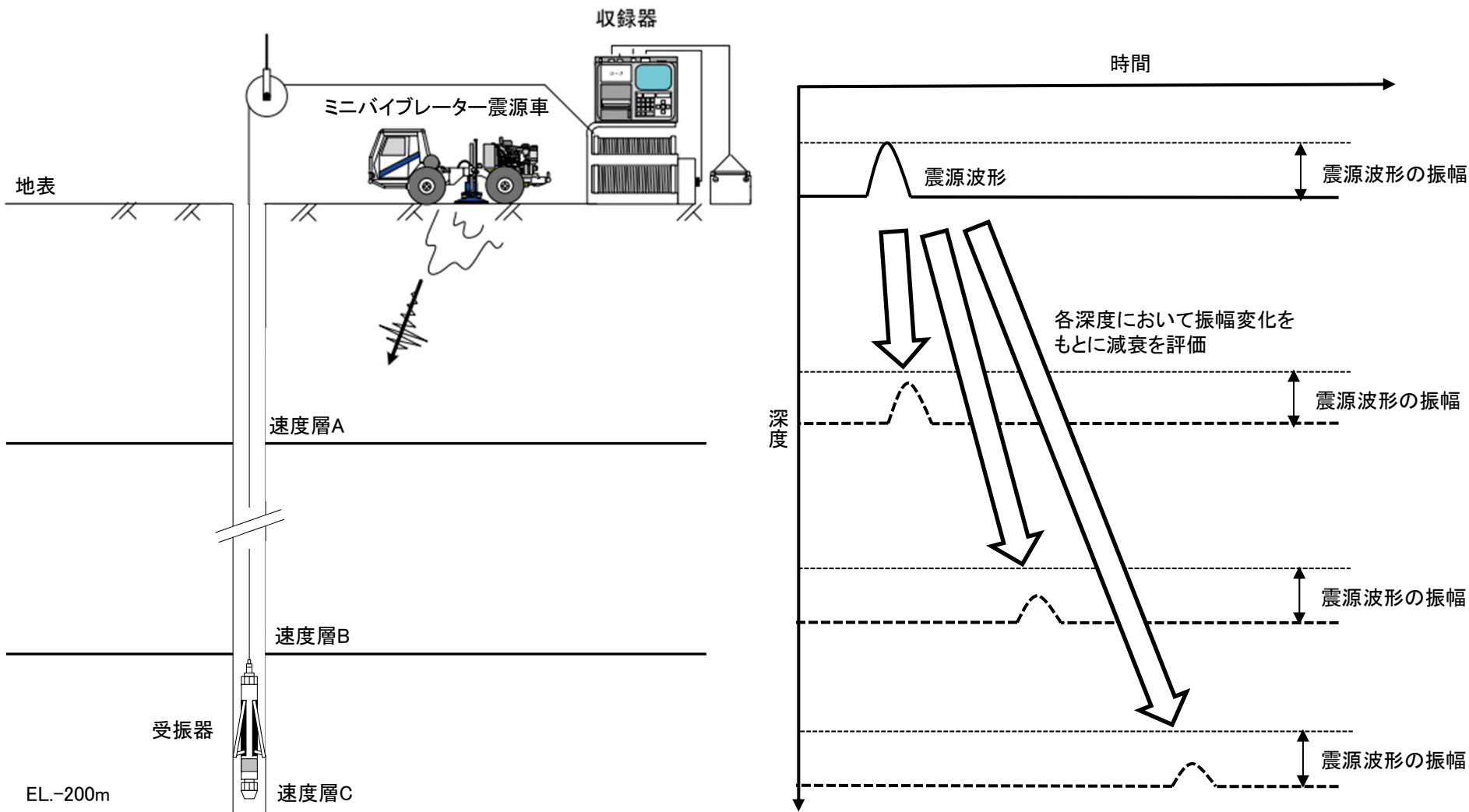
- 発電所構内において、EL. -200mまでの追加ボーリング調査を3箇所を実施し、地盤減衰（Q値）を測定。



【補足①】ボーリング孔内減衰測定結果

■ ボーリング孔内における減衰測定^{7), 8)}

- 地表にて震源車を用いて人工的に励起した振動を追加ボーリング孔内に設置した受振器で観測⁷⁾し、震源位置の波形の振幅と孔内受振器の波形の振幅の関係から速度層区間ごとのQ値を算出⁸⁾する。（参考④）



減衰評価イメージ図

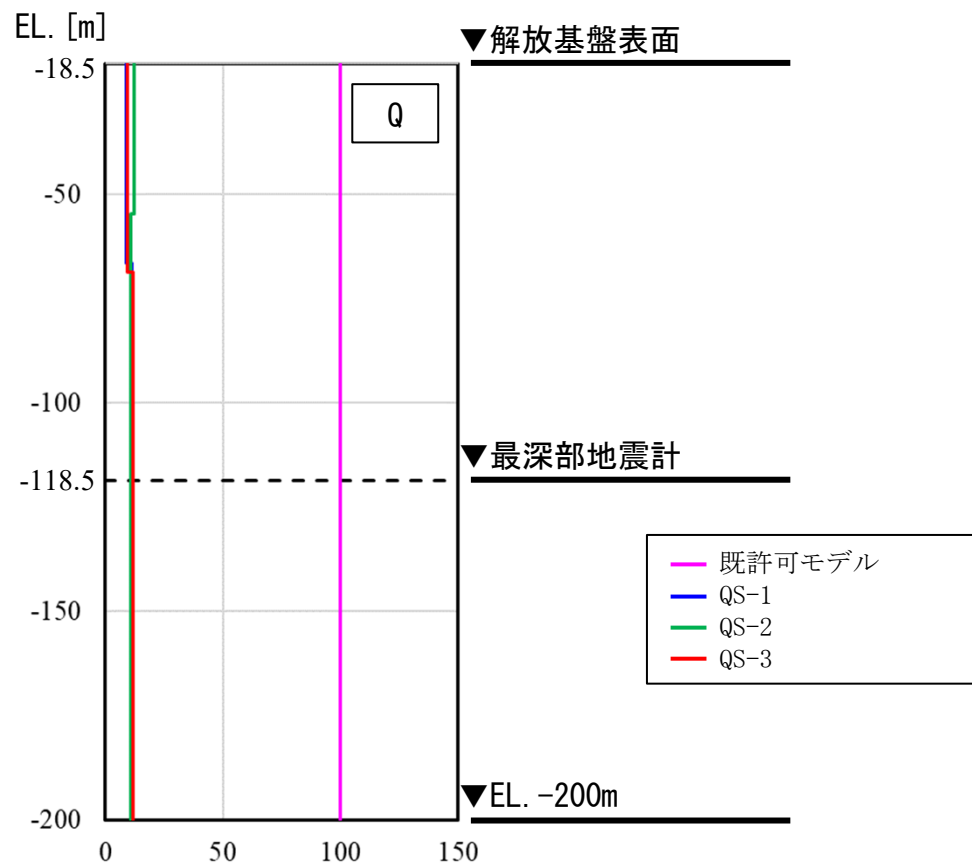
【補足①】ボーリング孔内減衰測定結果

■ ボーリング孔内における減衰測定の結果

- EL. -118.5mからEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）について、既許可モデル（Q=100）は、QS-1孔からQS-3孔までのQ値（10.6～11.8）を大きく上回り、大きな保守性を有する。

孔名	EL. (m)	卓越周波数 (Hz)	Q値	減衰定数 h (%)
QS-1	-18.5 ~ -66.5	24	9.0	5.6
	-66.5 ~ -200.0	24	11.4	4.4
QS-2	-18.5 ~ -54.5	29	12.2	4.1
	-54.5 ~ -200.0	33	10.6	4.7
QS-3	-18.5 ~ -68.5	32	9.3	5.4
	-68.5 ~ -200.0	28	11.8	4.2

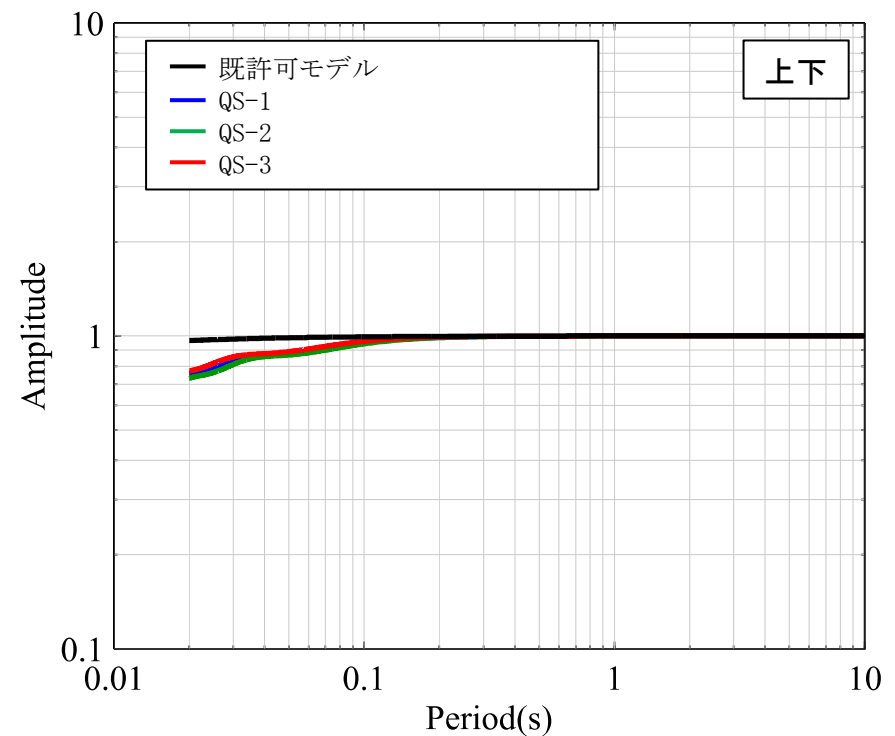
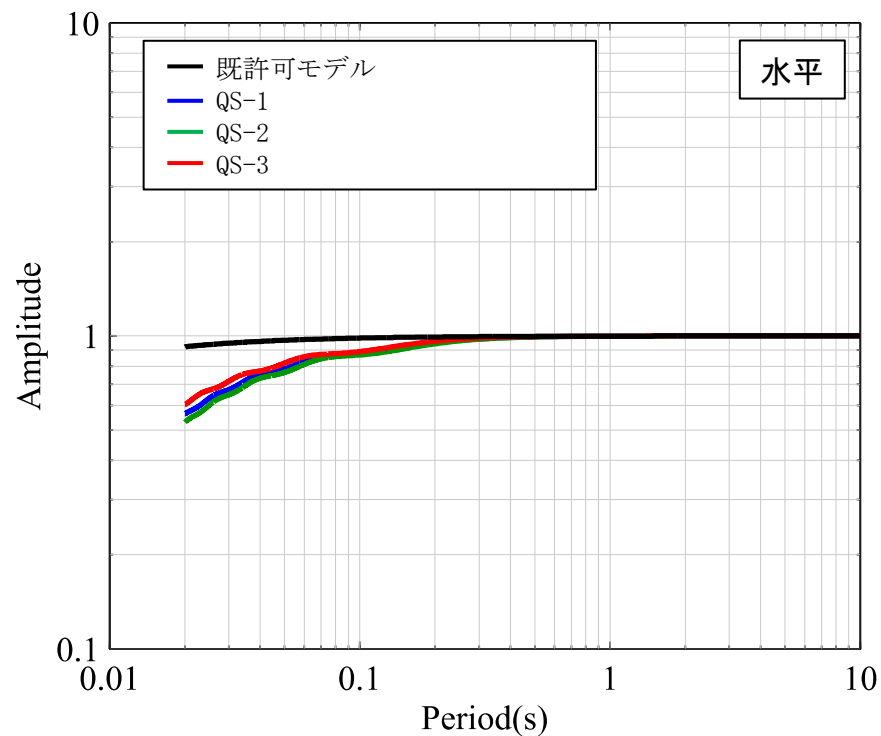
※ 調査結果は解放基盤以深からEL.-200mに範囲を統一したものを記載



【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

■ ボーリング孔内減衰測定結果による伝達関数の比較結果

- EL. -118.5mからEL. -200mの範囲の伝達関数について、既許可モデルは、QS-1孔からQS-3孔までの伝達関数に対して、短周期から長周期までの全ての周期帯において同等もしくは上回り、短周期側では大きな保守性を有する。



伝達関数の比較 (EL. -118.5m /EL. -200m)

【補足①】 ボーリング孔内減衰測定結果

■ 伝達関数の比較に用いた物性値について

- 前頁の伝達関数の比較に用いた物性値は下記の通り。Vs、Vpについては各孔のPS検層結果を用いた。

最深部地震計 ▼ (EL. -118.5m)	既許可モデル			QS-1孔			QS-2孔			QS-3孔		
	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
	1600	3700	100	1930	4010	11.4	1880	3760	10.6	2170	4320	11.8
▼ (EL. -200m)	1600	3700	100	1930	4010	100	1880	3760	100	2170	4320	100

【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

【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

■ 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

- ・ ある広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）⁹⁾及び垣見ほか（2003）¹⁰⁾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（67～69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。

【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

■ 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 $2.5 \times 10^{-4} \text{m/年}$ ）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）⁹⁾（図1）及び垣見ほか（2003）¹⁰⁾（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）⁹⁾の領域O及び垣見ほか（2003）¹⁰⁾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（68～69頁）。

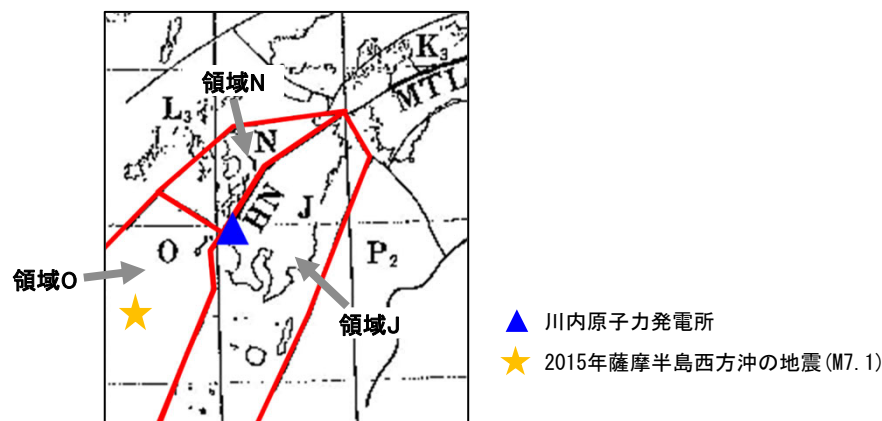


図1 萩原(1991)⁹⁾の地震地体構造区分（九州地方を拡大）

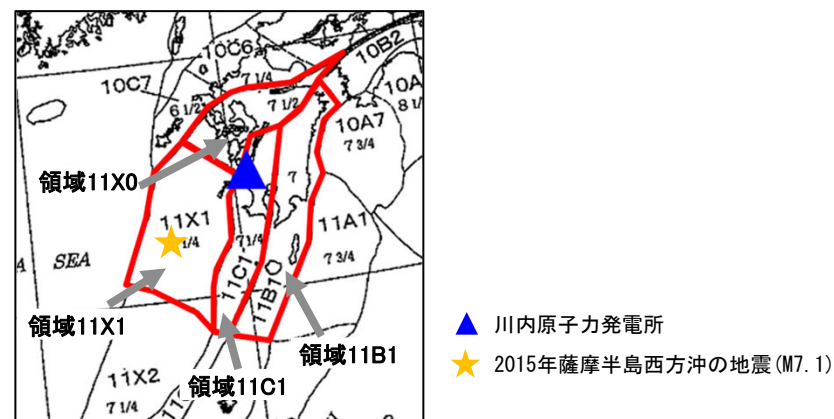


図2 垣見ほか(2003)¹⁰⁾の地震地体構造区分（九州地方を拡大）

【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

- 気象庁カタログ更新後の萩原（1991）⁹⁾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。

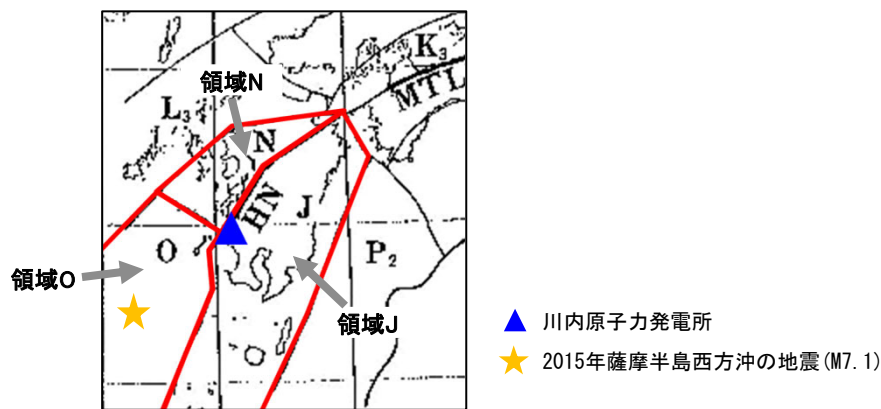


図3 萩原(1991)⁹⁾の地震地体構造区分(九州地方を拡大)

表1 萩原(1991)⁹⁾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	7.1/6.8/6.6	1.00	0.84
N		(5.0)	(7.1/6.8/6.6)	(1.00)	(0.88)
O		5.0	6.9	0.99	0.36
		(5.0)	(6.9)	(1.10)	(0.33)
		5.0	7.1	0.85	0.33
		(5.0)	(6.6)	(0.97)	(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)。

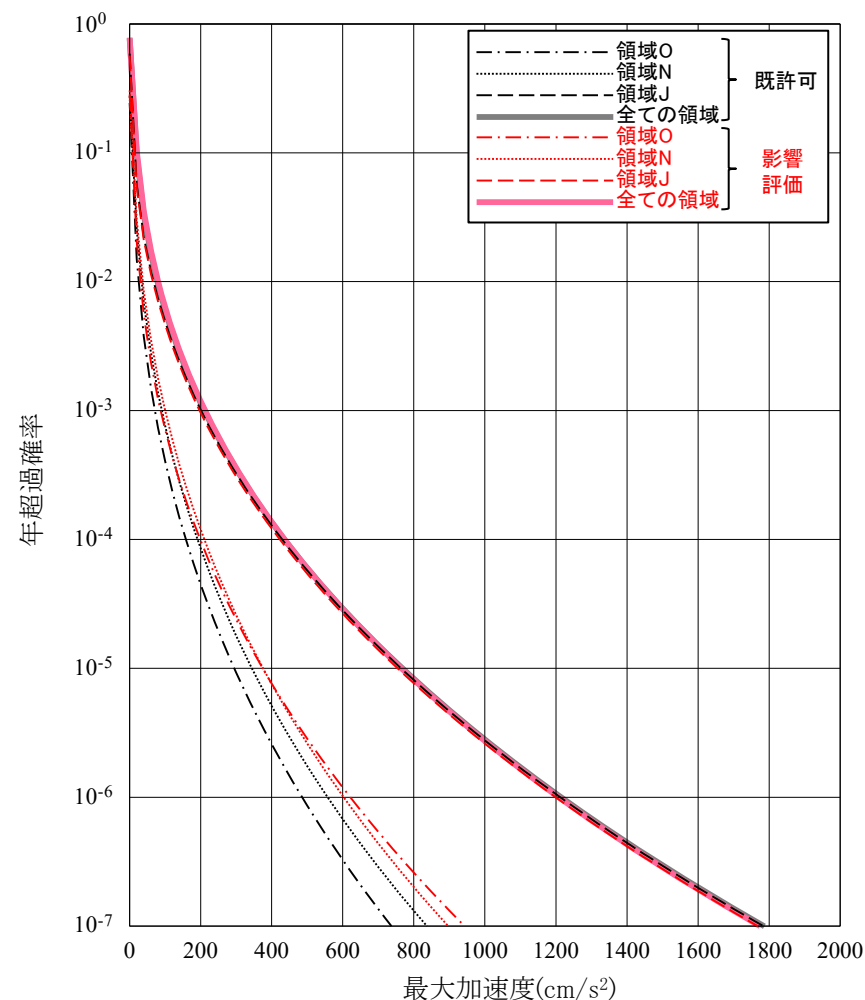


図4 領域ごとのハザード曲線の比較
(萩原(1991)⁹⁾)

【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

- 気象庁カタログ更新後の垣見ほか（2003）¹⁰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。

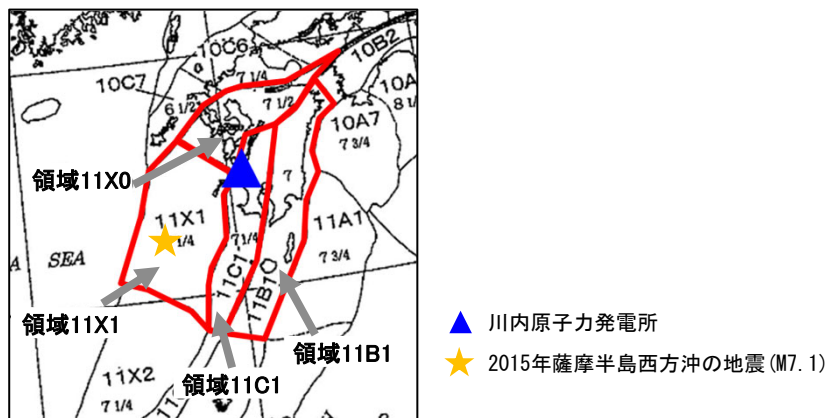


図5 垣見ほか（2003）¹⁰の地震地体構造区分（九州地方を拡大）

表2 垣見ほか（2003）¹⁰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		5.0 (5.0)	6.8 (6.8)	0.97 (0.97)	0.34 (0.37)
11C1	1926.1～ 2022.3	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	(1926.1～ 2011.12)	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）。

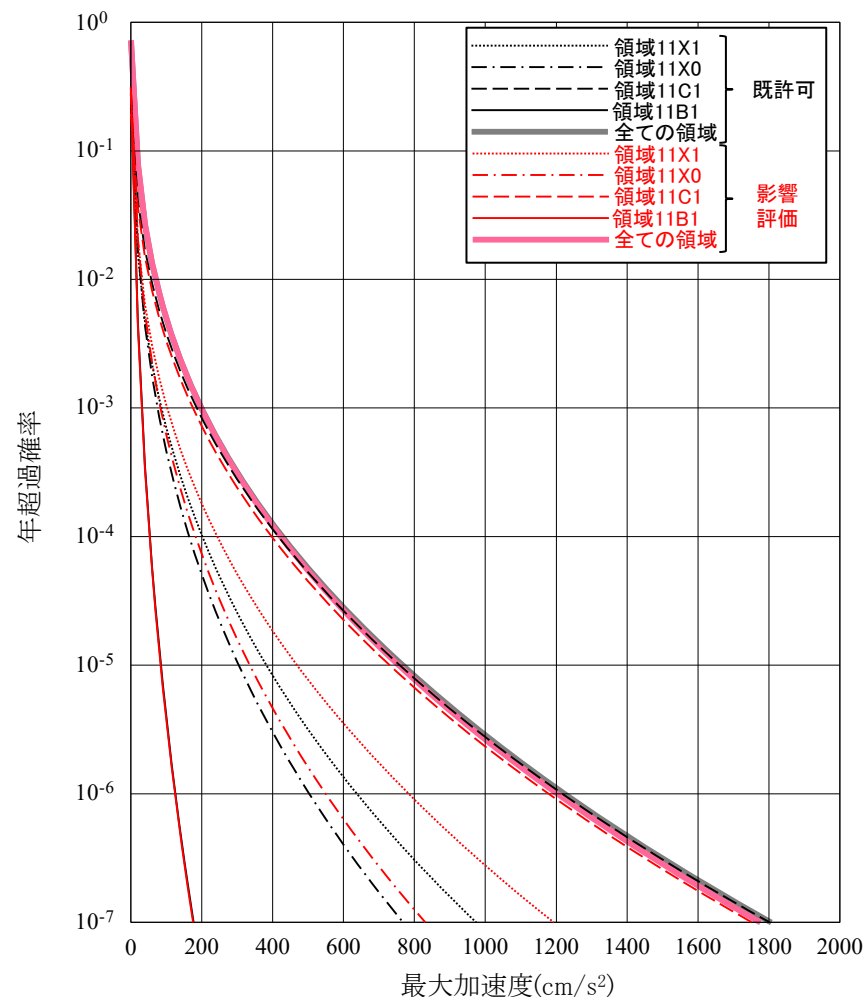


図6 領域ごとのハザード曲線の比較
(垣見ほか(2003)¹⁰)

【参考①】 速度構造の見直しに係る経緯について

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価にあたり、当初申請（令和3年4月26日申請）においては、既許可時審査以降継続的に取得している鉛直アレイの地震観測記録の観測事実等に基づき、既許可モデルの地盤減衰（Q値）を見直したモデル（現申請モデル：73頁）を設定
- 現申請モデルを用いたシミュレーションによる応答波の応答スペクトルと地震観測記録との整合性が確認できないことから、審査会合での議論を踏まえて、現申請モデルの速度構造を見直す方針に変更。
- 上記を踏まえ、シミュレーションによる応答波の応答スペクトルと地震観測記録との整合性を改善するため、速度構造の見直しの検討を実施。また、速度構造を見直したモデル（見直しモデル：73頁）と既許可モデルの観測記録との整合性の確認を実施した。
 - 見直しモデルは、速度構造を見直すことにより水平方向の周期0.1秒から0.2秒における観測記録との整合性が改善する傾向が見られた（72頁、78頁、参考②）。

しかしながら、見直しモデルの地下深部の速度構造については、地震観測記録やPS検層による直接的な地盤物性等の見直しモデルの妥当性を検証するための十分なデータがないことから合理的な説明ができないと判断した（73頁）。
 - 一方、既許可モデルは、現申請モデルより地盤減衰が小さく、応答波の応答スペクトルが短周期帯で増大することにより観測記録との整合性が改善され、短周期で大きな保守性を有する傾向がみられる（参考②）



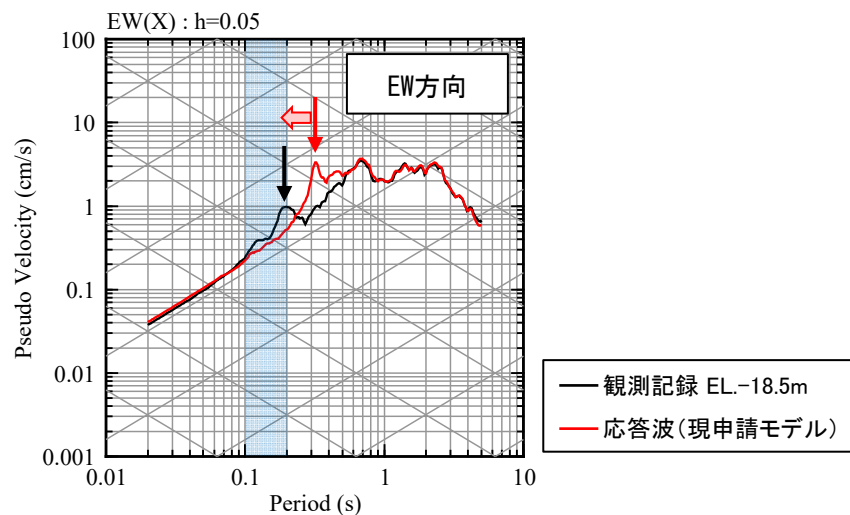
- 以上を踏まえ、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価については既許可モデルを用いることとする。

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

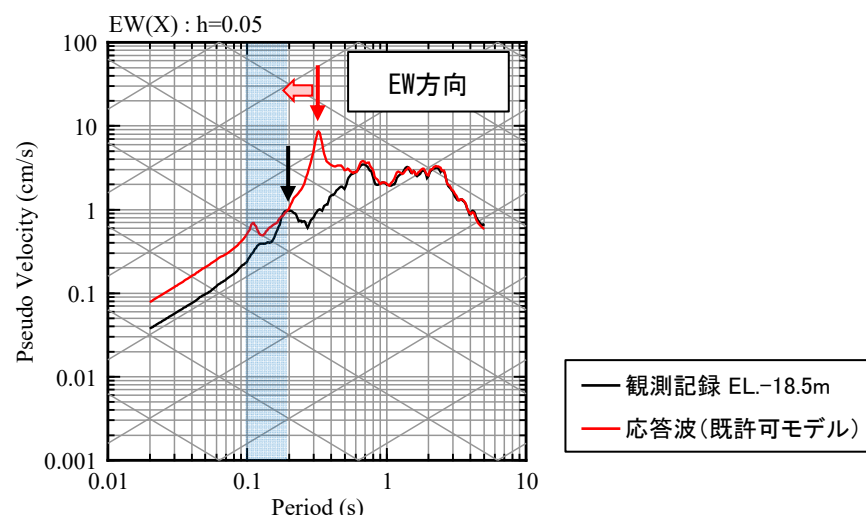
速度構造を見直したモデルの設定 (1/2)

- 観測記録の応答スペクトルでは水平方向の周期0.1秒から0.2秒にピークが見られるのに対し、速度構造が同じである現申請モデル及び既許可モデルの応答波の応答スペクトルでは周期0.3秒から0.4秒にピークが見られ、両者のピークの周期がずれている。
- このピークの周期のずれは、速度構造に起因すると考えられ、ピークを合わせるためには、地下構造モデルの速度を速くする必要がある。既許可時から得られている以下を参照し、速度構造の見直しを検討。
 - 2号炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）では、解放基盤表面付近のせん断波速度は $V_s=2150\text{m/s}$ である。（74頁）
 - PS検層結果に基づく速度層断面では、炉心位置周辺のせん断波速度は $V_s=2050\text{m/s}$ である。（75頁～77頁）
- 以上を踏まえ、次頁のとおり、見直しモデルを設定。

〔⑪熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）の例〕



現申請モデル



既許可モデル

【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

速度構造を見直したモデルの設定 (2/2)

- EL. -28.5m~EL. -200mのVsについては、炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）を踏まえ、Vs=2150m/sと設定。EL. -200m~EL. -480mのVsについては、上下層の速度を参照してVs=2150m/sと設定。
- EL. -28.5m~EL. -480mのVpについては、炉心位置周辺におけるPS検層結果（建設時の地質調査結果）のVp=4250m/s、PS検層結果に基づく速度層断面のVp=4330m/s、及びEL. -480m以深の微動アレイの速度構造のVp=4400m/sを基に、Vs=2150m/sの範囲は同じVpの値となるようVp=4400m/sと設定。

なお、見直しモデルの地下深部の速度構造については、地震観測記録やPS検層による直接的な地盤物性等の見直しモデルの妥当性を検証するための十分なデータがないことから合理的な説明ができないと判断した。

(現申請モデル)

(見直しモデル)

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	設定根拠 (Vs、Vp)
解放基盤表面											
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	12.5	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定	2.70	1500	3200	12.5	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定
-28.5m											
-118.5m	-0.01	2.70	1600	3700	12.5	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定	2.70	2150	4400	12.5	PS検層結果を基に設定
-200m											
-200m	-0.182	2.70	1600	3700	100	微動アレイの速度構造を基に設定	2.70	2150	4400	100	上下層の速度を基に設定
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200		2.70	2150	4400	200	微動アレイの速度構造を基に設定
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか（2004）を基に設定	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか（2004）を基に設定

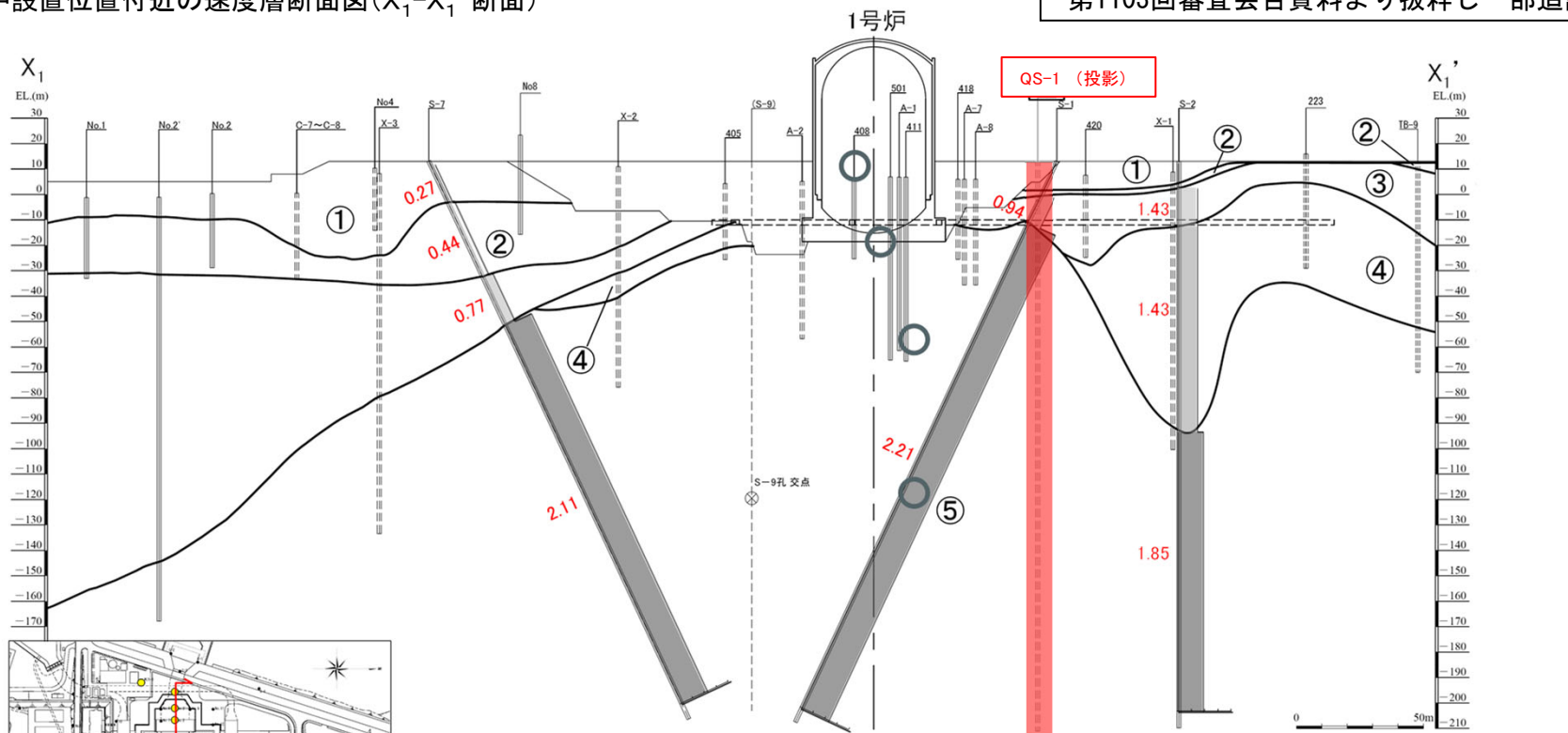
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

PS検層結果に基づく速度層断面 (1/3)

– PS検層結果に基づく速度層断面では、解放基盤表面 (EL. -18.5m) 以深の原子炉建屋直下及び地震計位置で $V_s=2050\text{m/s}$ 、 $V_p=4330\text{m/s}$ である。

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X_1 - X_1' 断面)

第1103回審査会合資料より抜粋し一部追記※



速度層区分	S波速度 V_s (km/s)	P波速度 V_p (km/s)
①	0.28	1.17
②	0.52	1.86
③	0.90	2.51
④	1.37	3.40
⑤	2.05	4.33

○ 地震計設置位置(投影)

※第1103回会合資料の抜粋に、試掘坑位置、各速度層区分のP波速度、追加ボーリング位置 (QS-1~3) 及び地震計設置位置を追記

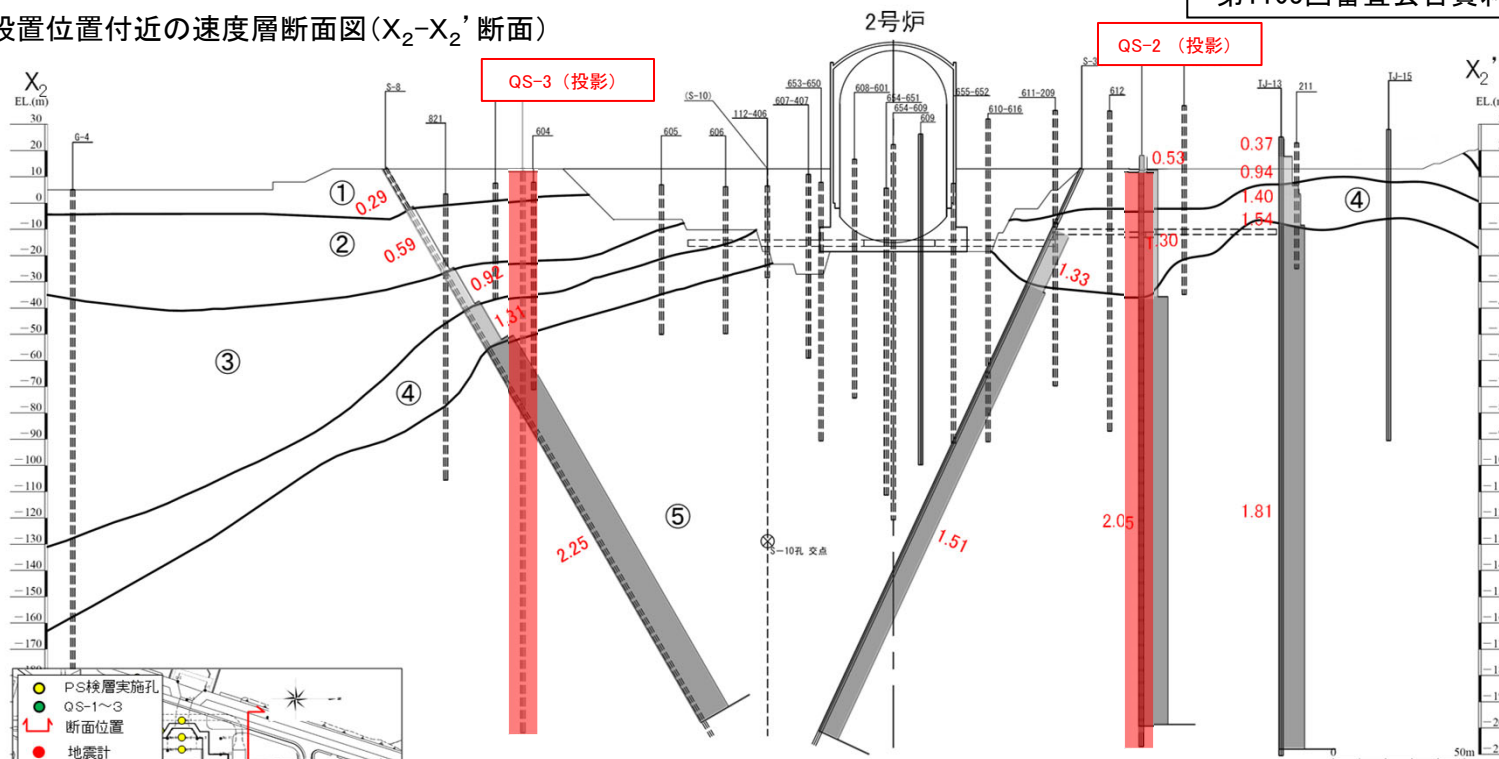
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

PS検層結果に基づく速度層断面 (2/3)

- PS検層結果に基づく速度層断面では、解放基盤表面 (EL. -18.5m) 以深の原子炉建屋直下及び地震計位置でVs=2050m/s、Vp=4330m/sである。

第1103回審査会合資料より抜粋し一部追記※

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X₂-X₂' 断面)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)	P波速度Vp (km/s)
①	0.28	1.17
②	0.52	1.86
③	0.90	2.51
④	1.37	3.40
⑤	2.05	4.33

※第1103回会合資料の抜粋に、試掘坑位置、各速度層区分のP波速度、追加ボーリング位置 (QS-1~3) 及び地震計設置位置を追記

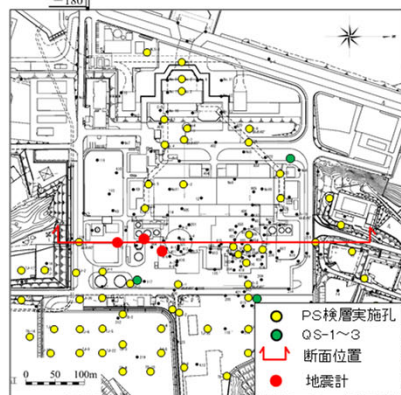
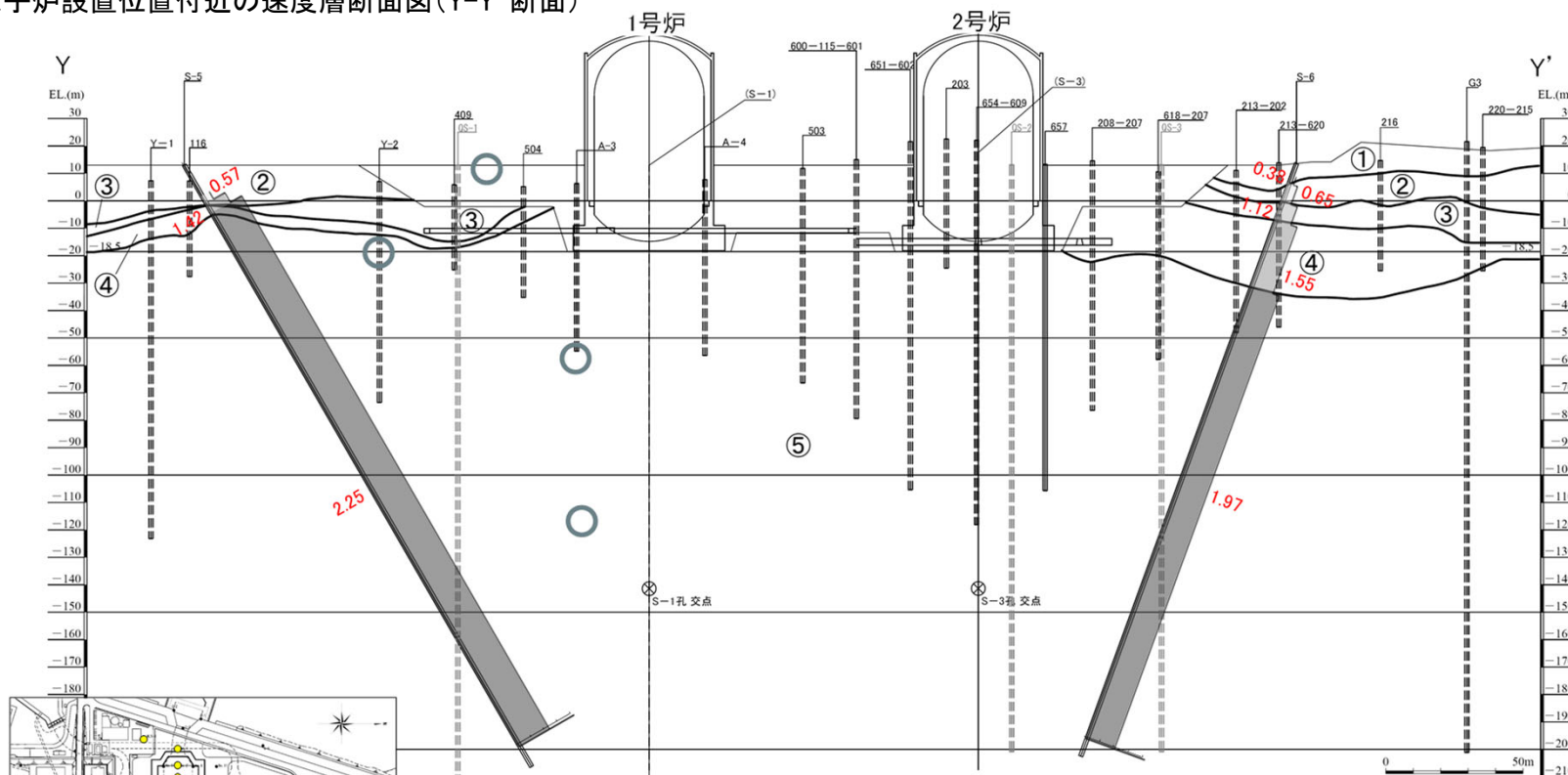
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

PS検層結果に基づく速度層断面 (3/3)

– PS検層結果に基づく速度層断面では、解放基盤表面 (EL. -18.5m) 以深の原子炉建屋直下及び地震計位置で $V_s=2050\text{m/s}$ 、 $V_p=4330\text{m/s}$ である。

第1103回審査会合資料より抜粋し一部追記※

原子炉設置位置付近の速度層断面図(Y-Y'断面)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)	P波速度Vp (km/s)
①	0.28	1.17
②	0.52	1.86
③	0.90	2.51
④	1.37	3.40
⑤	2.05	4.33

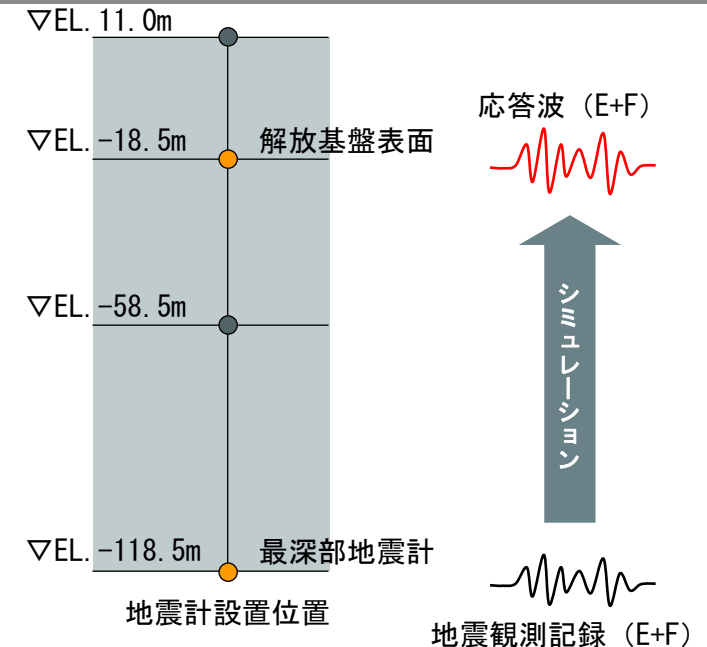
○ 地震計設置位置(投影)

※第1103回会合資料の抜粋に、各速度層のP波速度、追加ボーリング位置(QS-1~3)及び地震計設置位置を追記

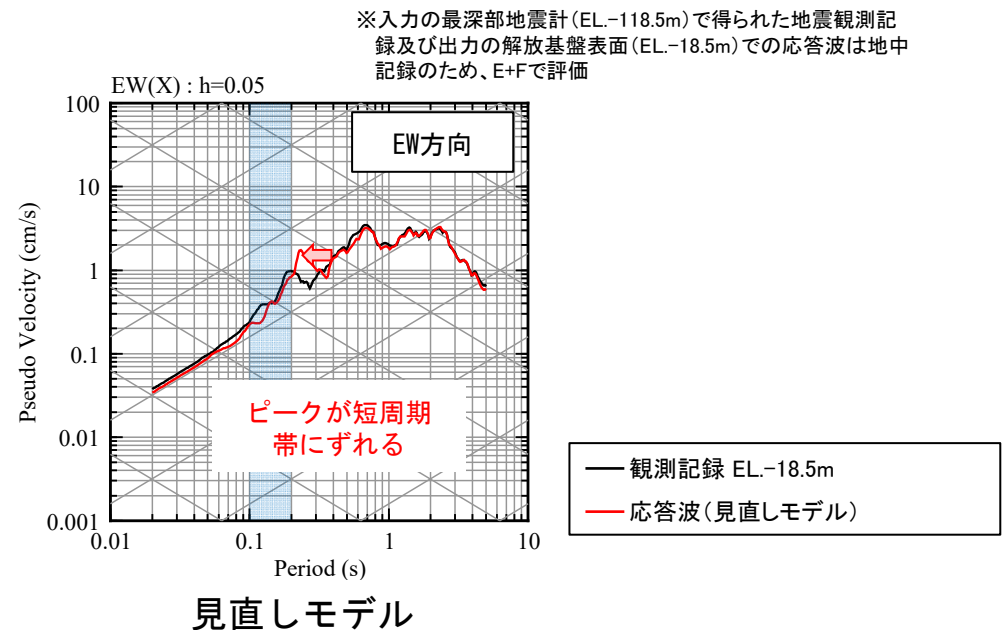
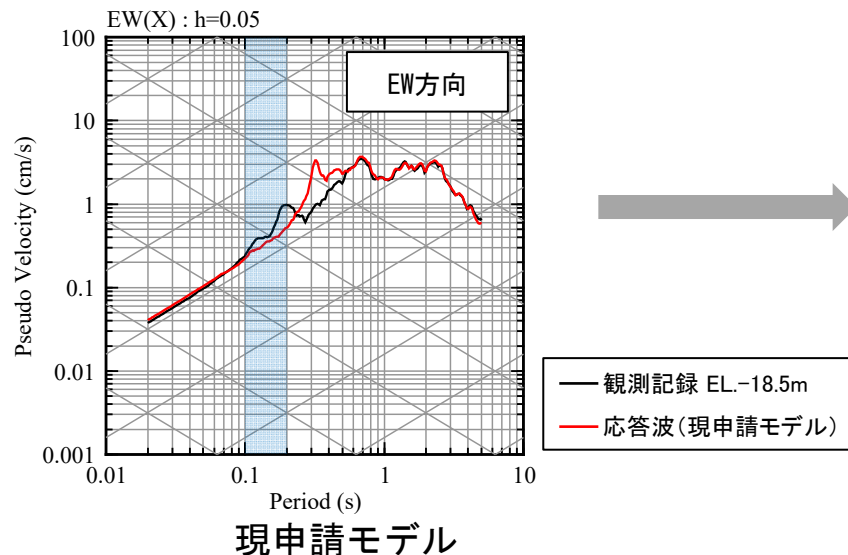
【参考①】速度構造の見直しに係る経緯について

速度構造を見直したモデルによる観測記録との整合性確認

- 速度構造を見直したモデル（73頁）を用いて、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。
- 見直しモデルは、現申請モデルに比べて速度を速くすることにより、現申請モデルの応答波に見られる0.3秒から0.4秒のピークが短周期帯にずれることから、周期0.1秒から0.2秒において、観測記録との整合性が改善されるものの、既許可モデルと同程度。（参考②）



〔⑪熊本県熊本地方（2016年熊本地震本震）の例〕



*入力最深部地震計(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



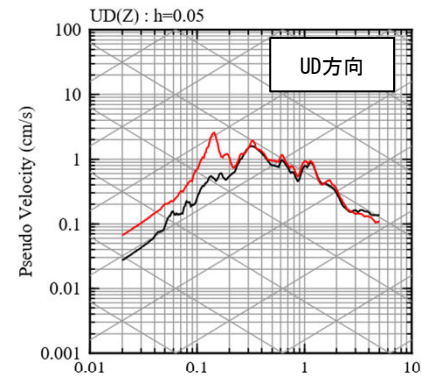
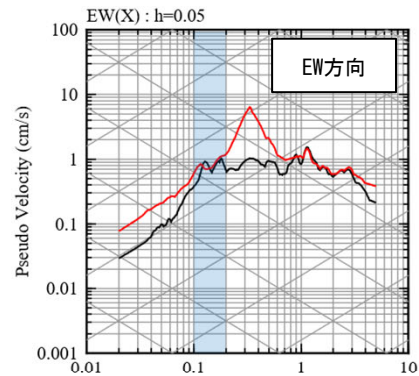
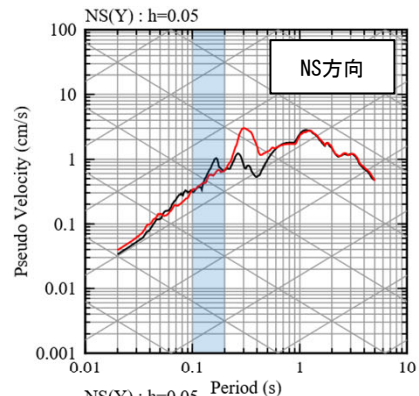
【参考②】 応答スペクトルの比較結果

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/20)

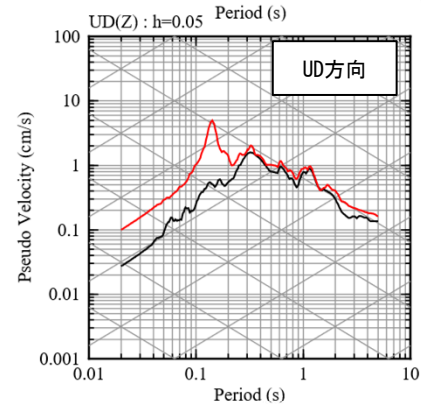
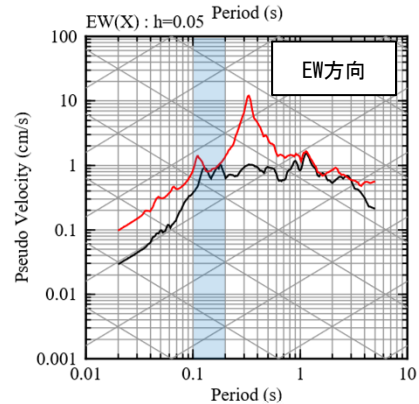
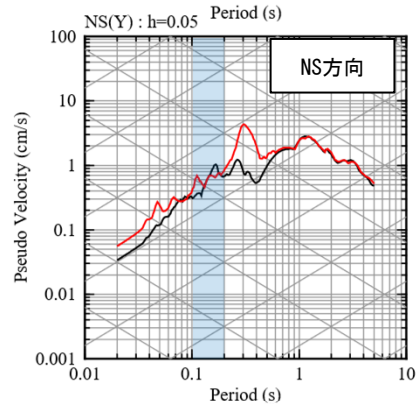
①九州西側海域

現申請モデル



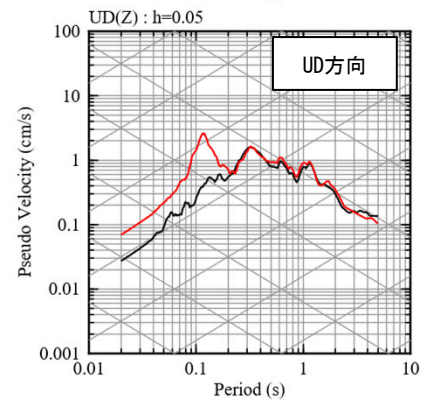
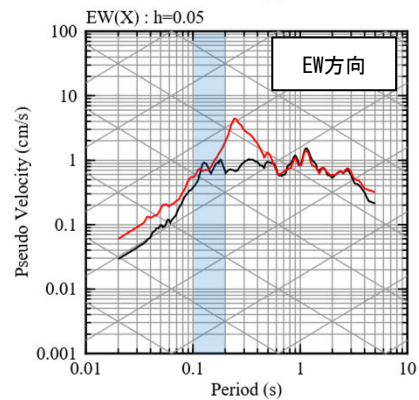
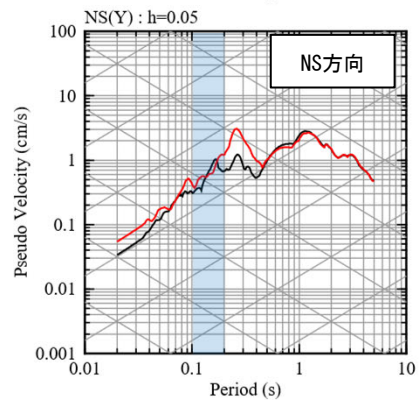
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



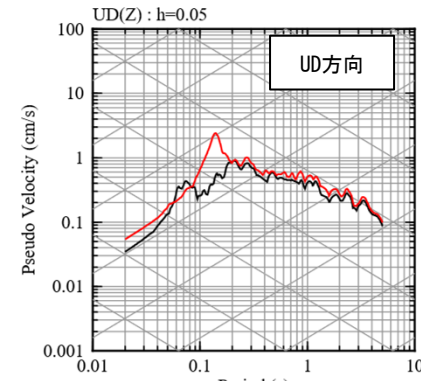
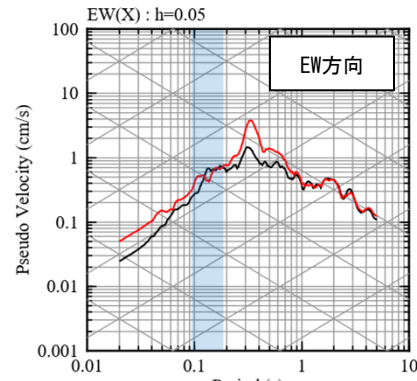
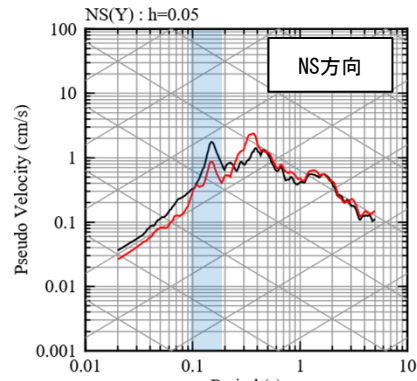
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (2/20)

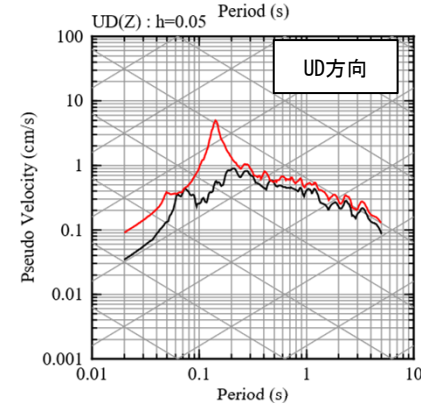
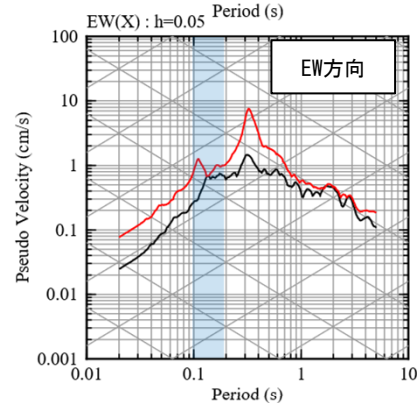
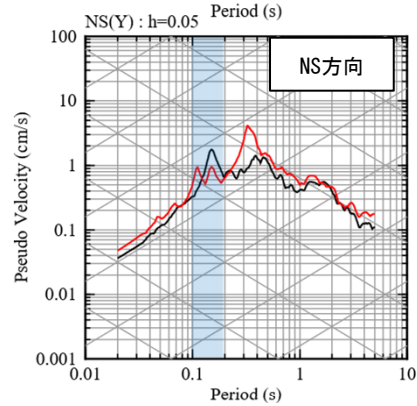
②鹿児島県北西部

現申請モデル



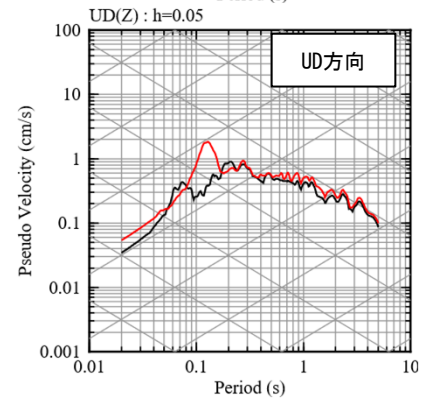
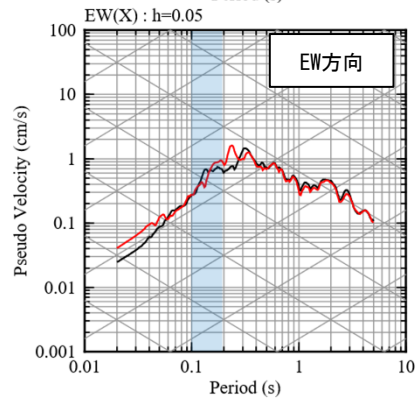
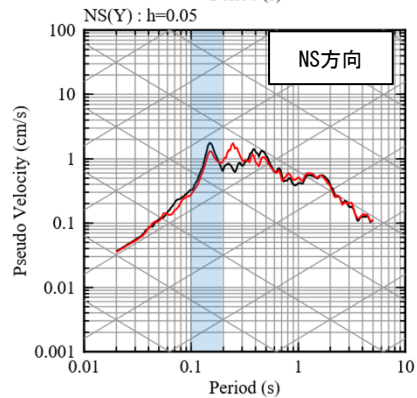
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



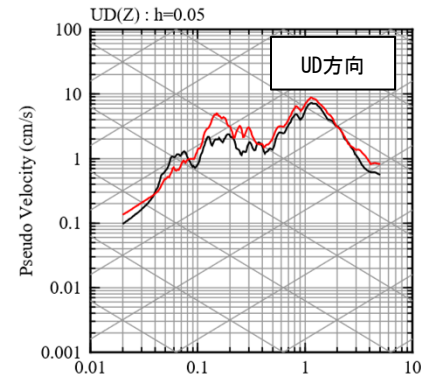
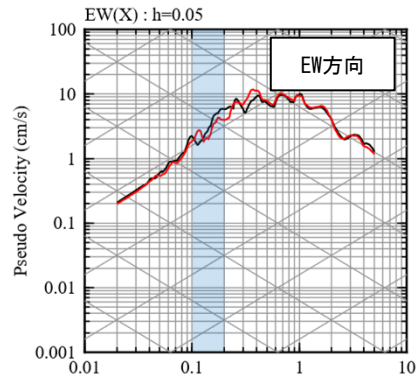
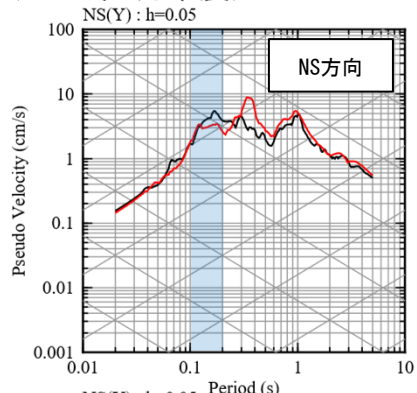
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (3/20)

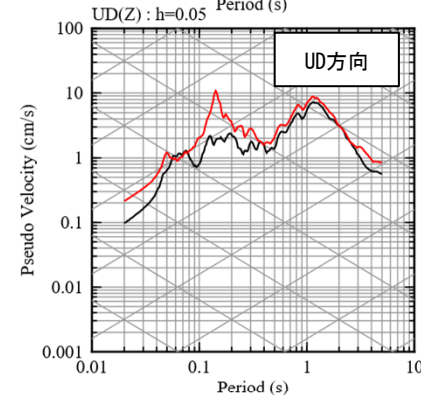
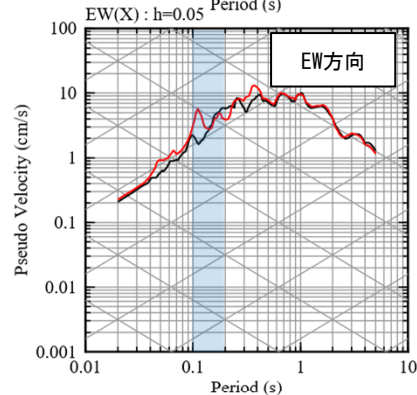
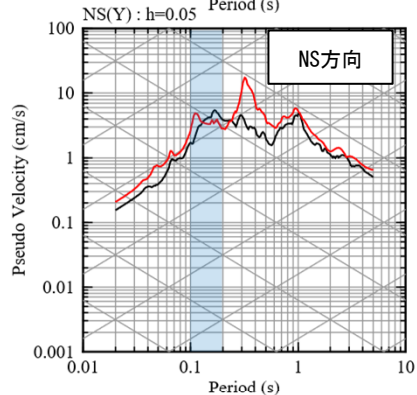
③鹿児島県北西部 (1997年3月本震)

現申請モデル



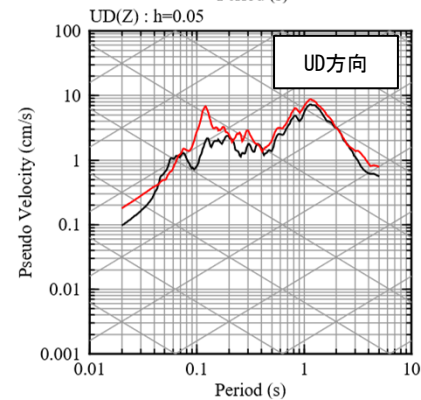
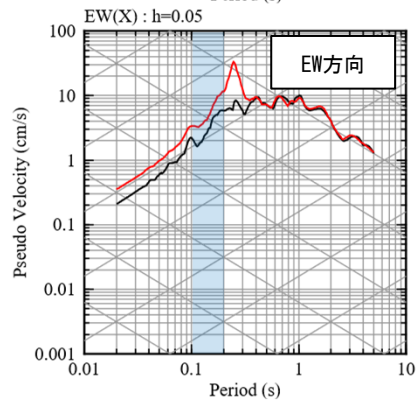
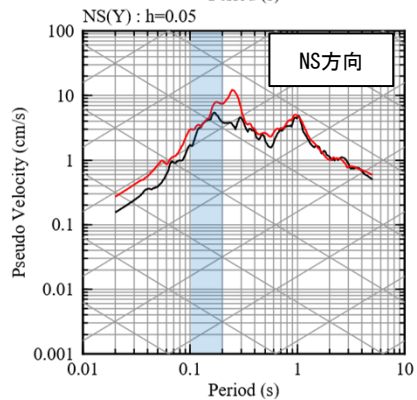
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



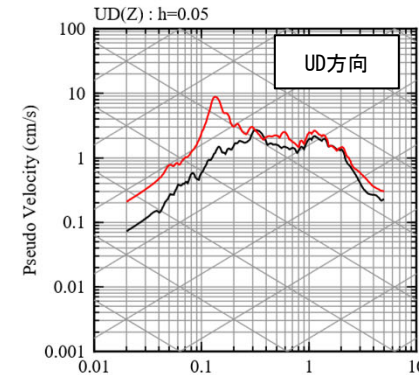
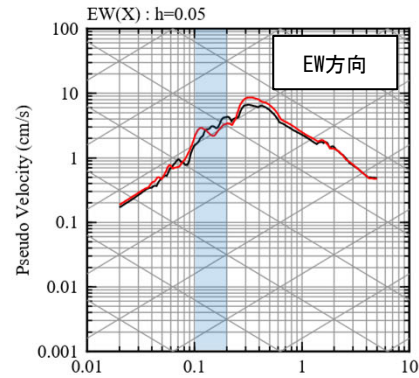
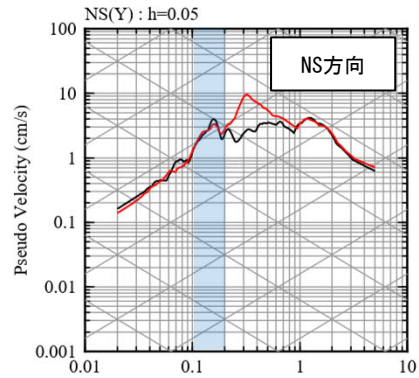
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (4/20)

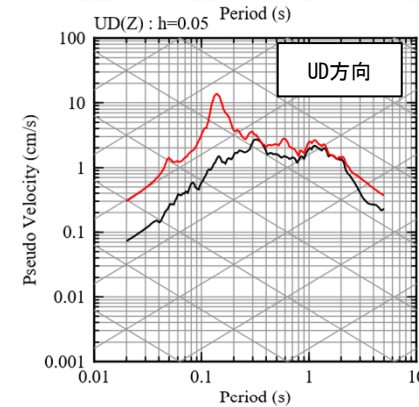
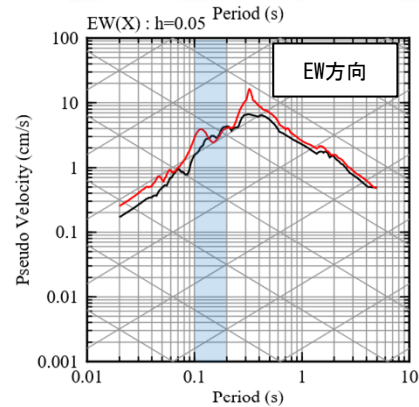
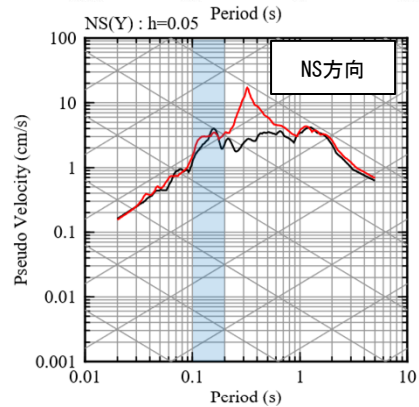
④ 鹿児島県北西部

現申請モデル



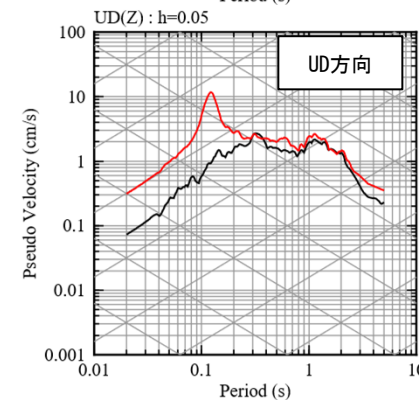
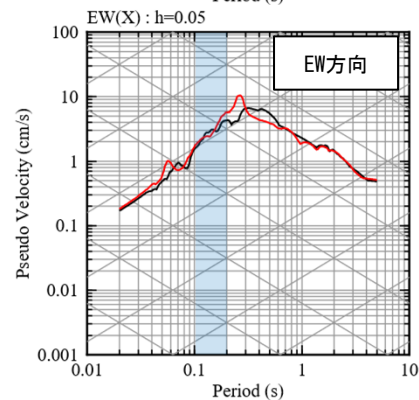
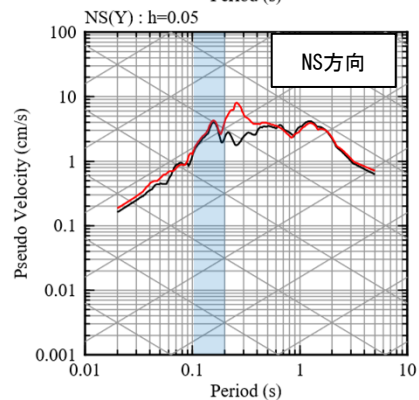
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



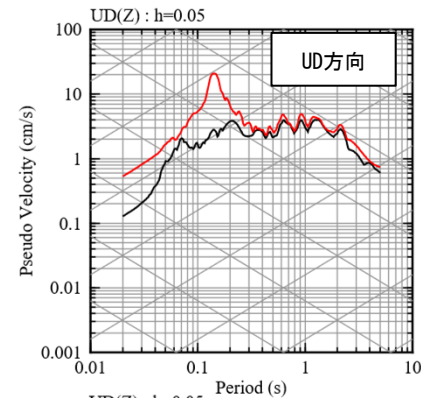
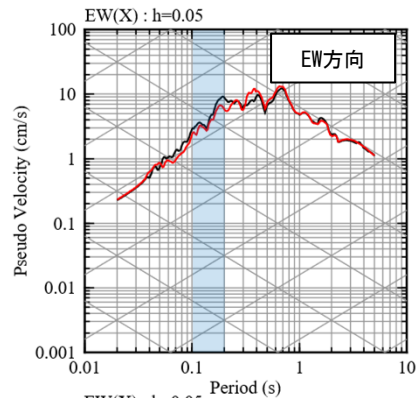
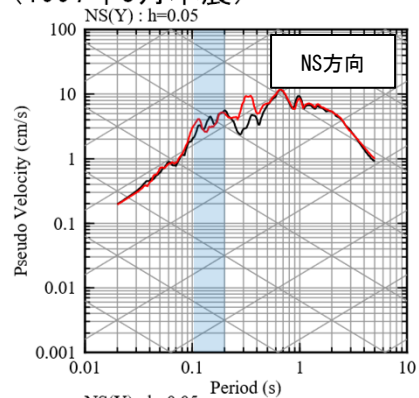
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/20)

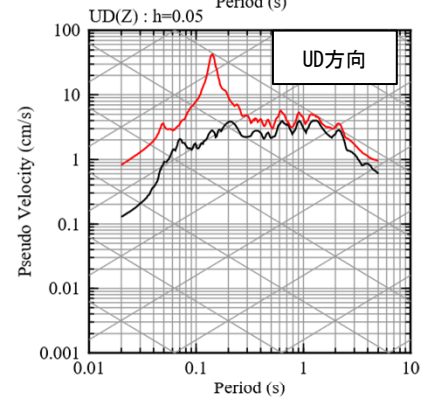
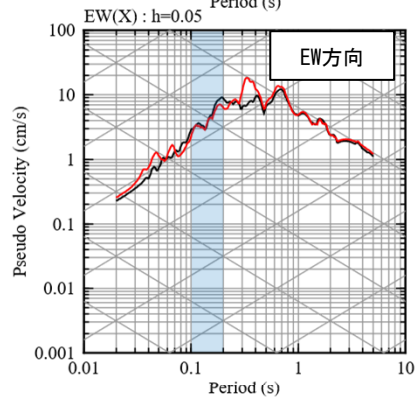
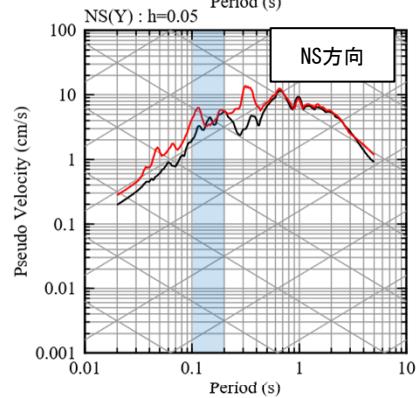
⑤鹿児島県北西部 (1997年5月本震)

現申請モデル



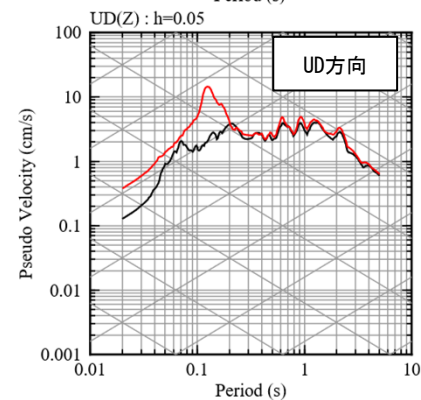
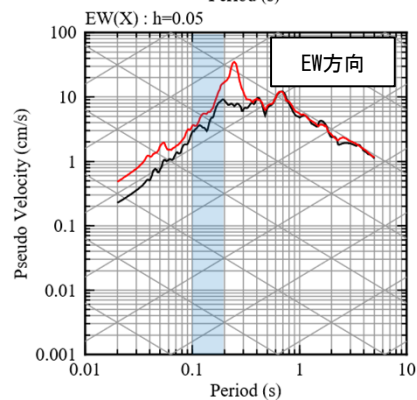
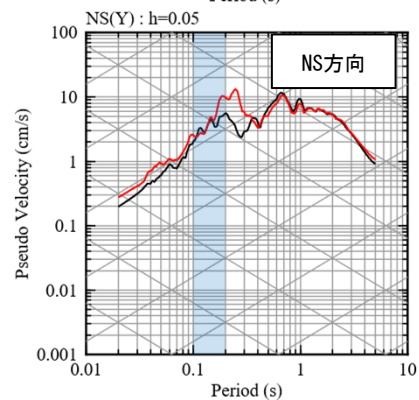
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



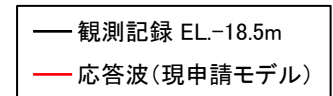
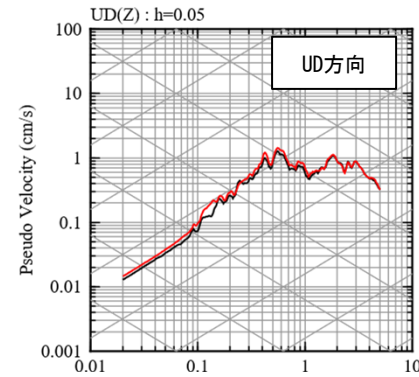
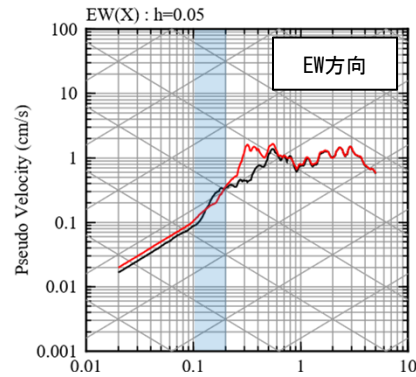
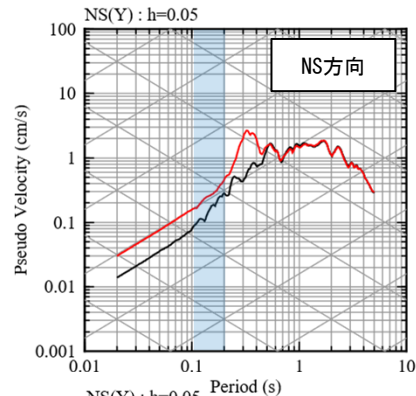
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

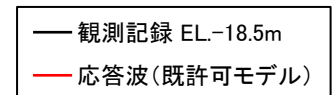
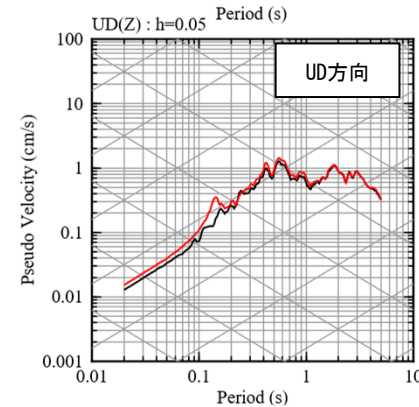
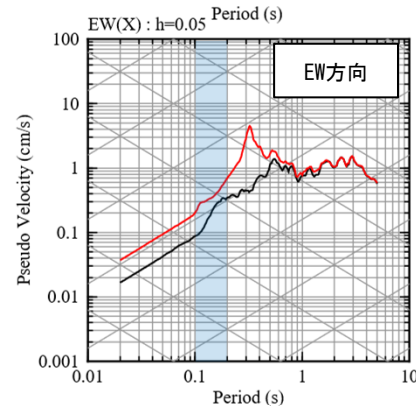
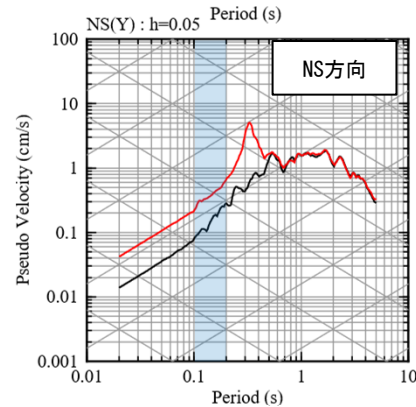
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/20)

⑥ 薩摩半島西方沖

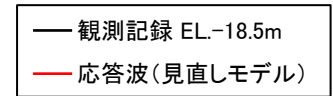
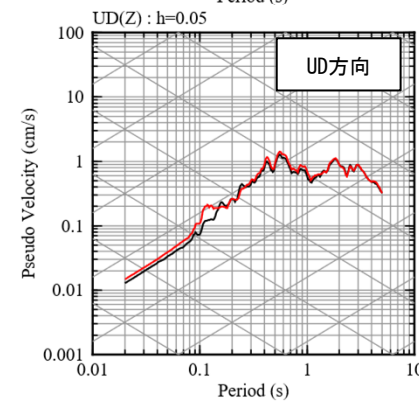
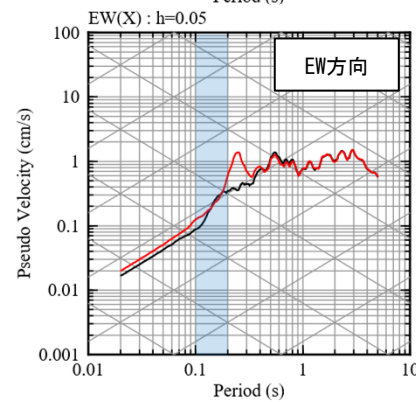
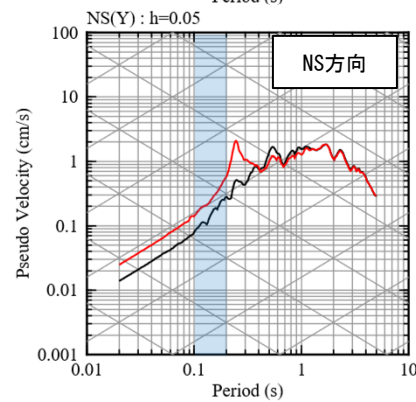
現申請モデル



既許可モデル



見直しモデル

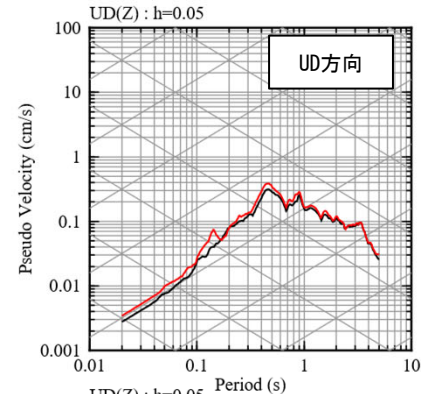
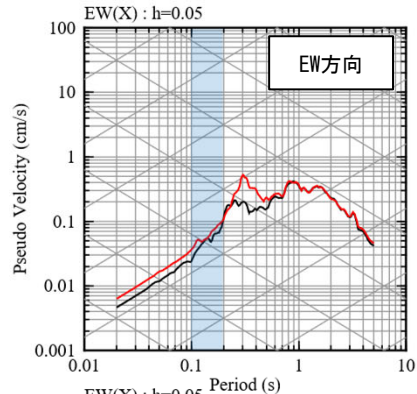
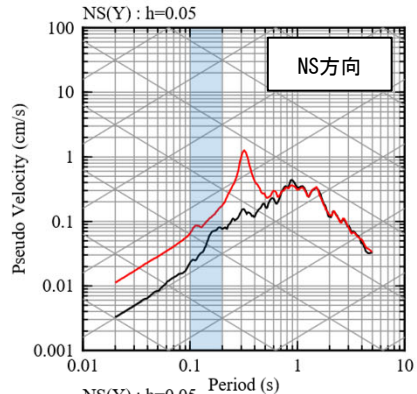


【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (7/20)

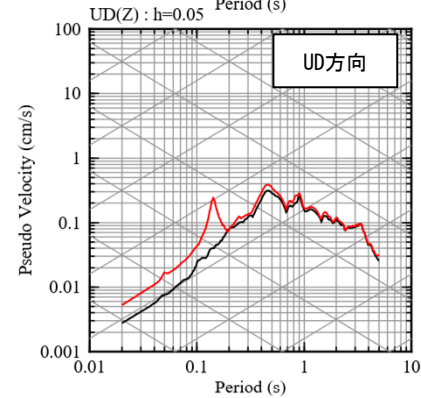
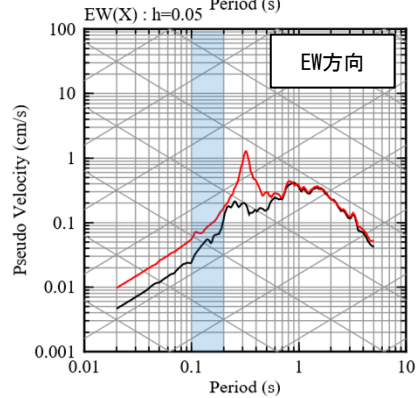
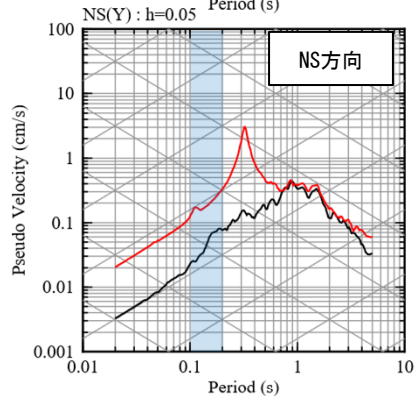
⑦ 薩摩半島西方沖

現申請モデル



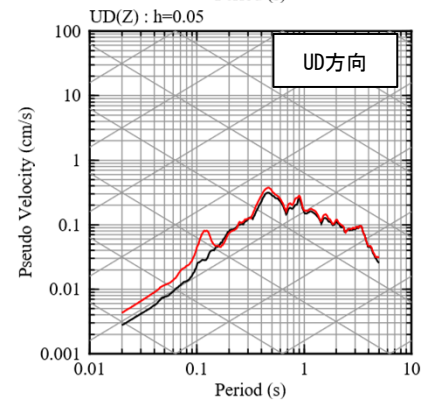
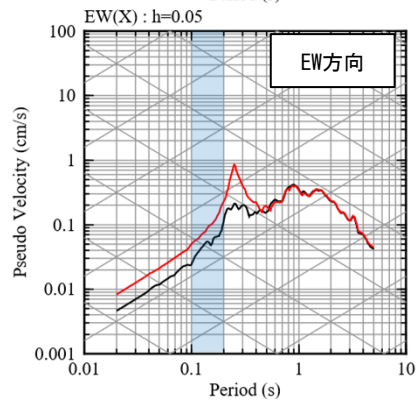
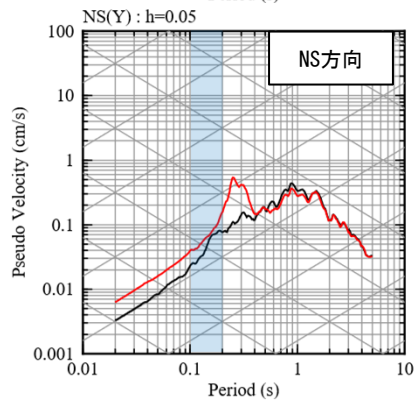
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



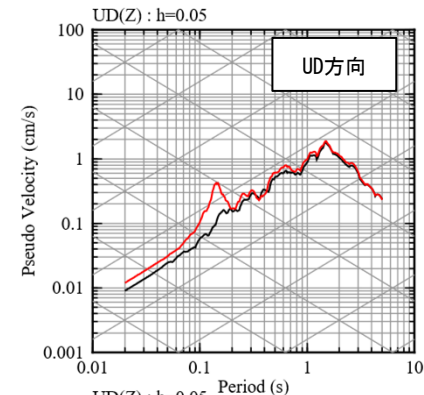
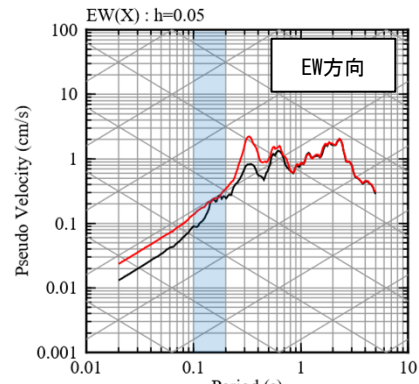
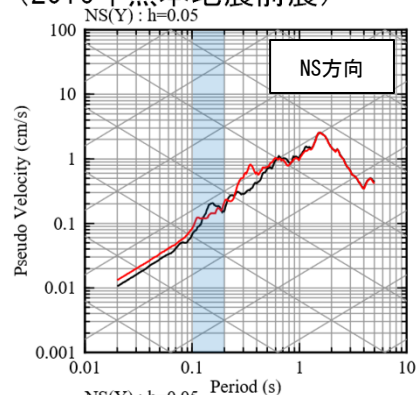
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (8/20)

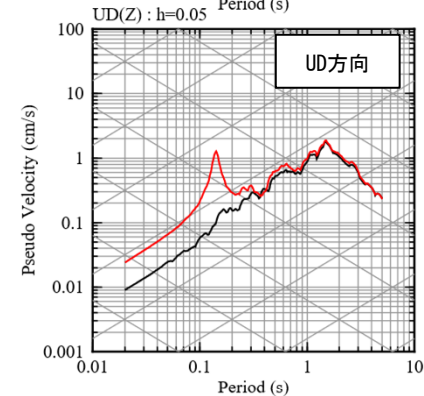
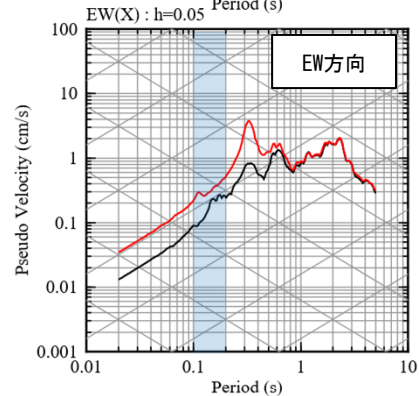
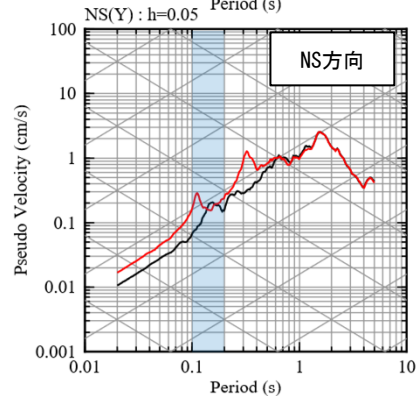
⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)

現申請モデル



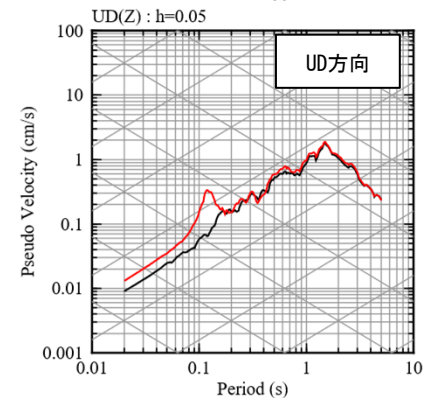
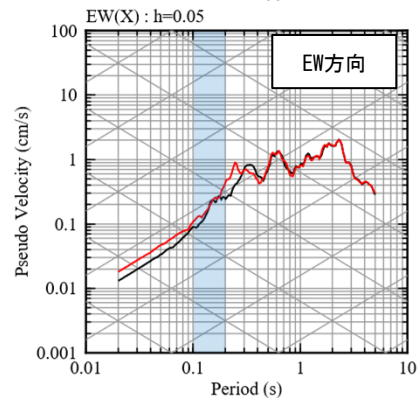
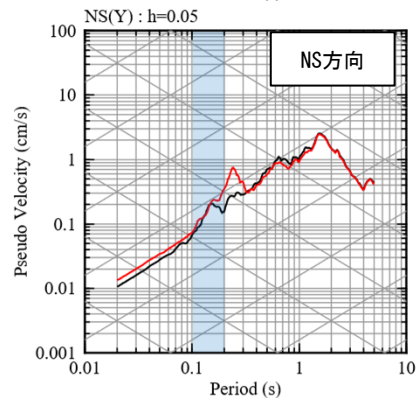
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



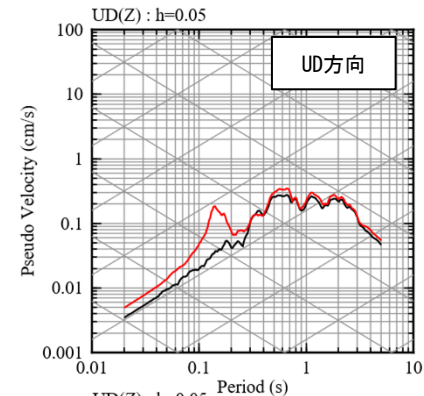
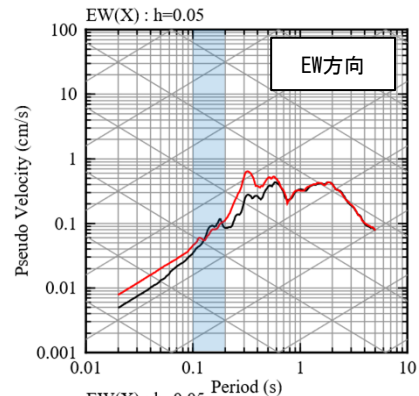
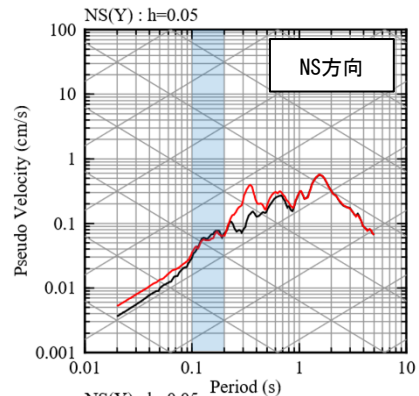
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (9/20)

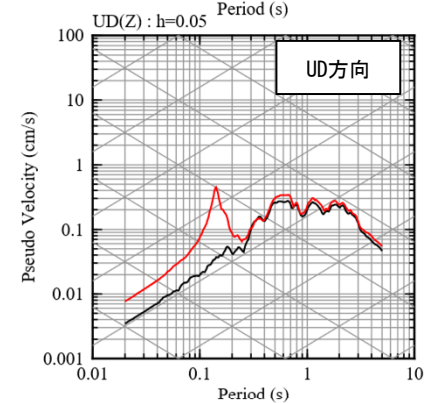
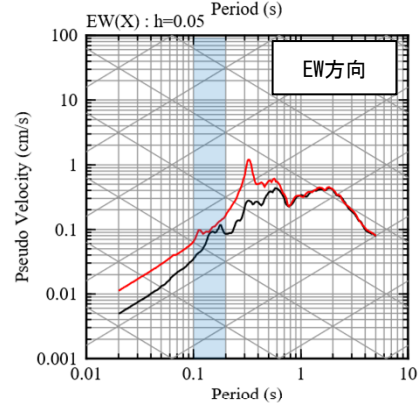
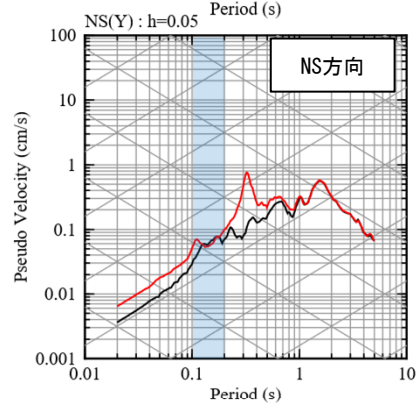
⑨ 熊本県熊本地方

現申請モデル



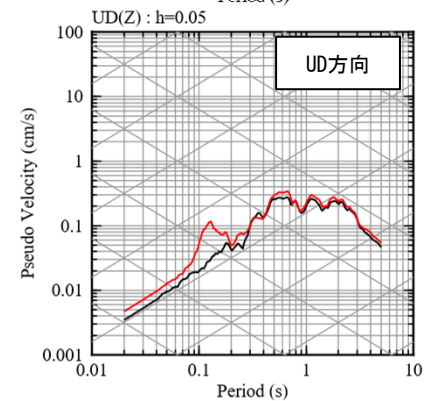
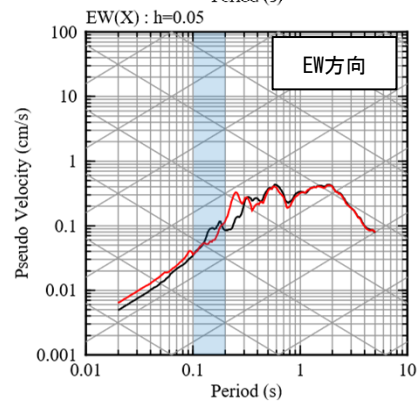
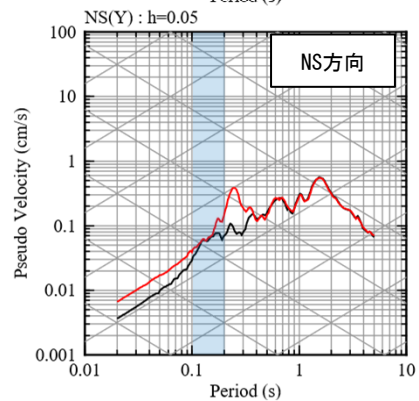
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



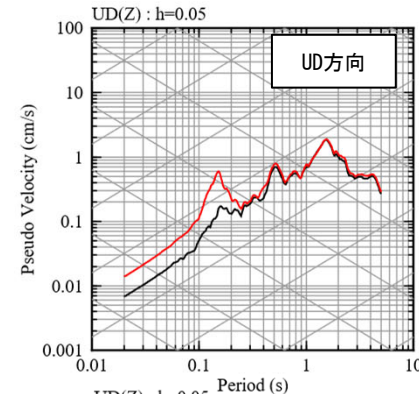
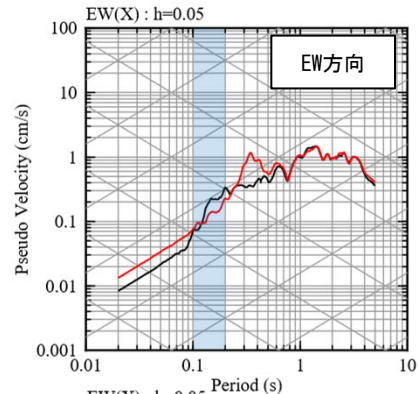
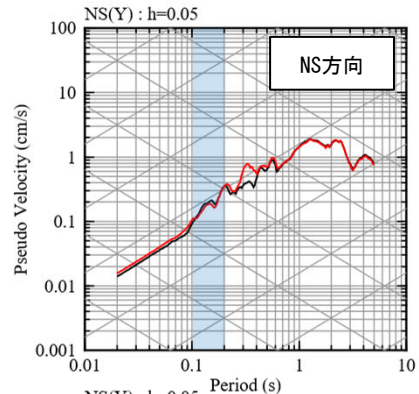
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (10/20)

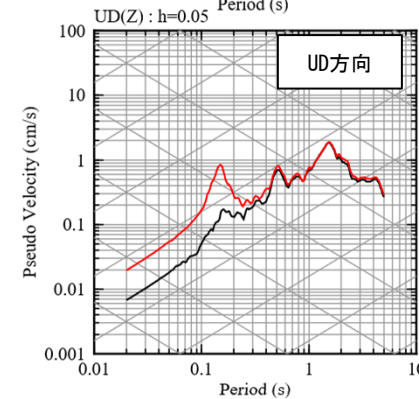
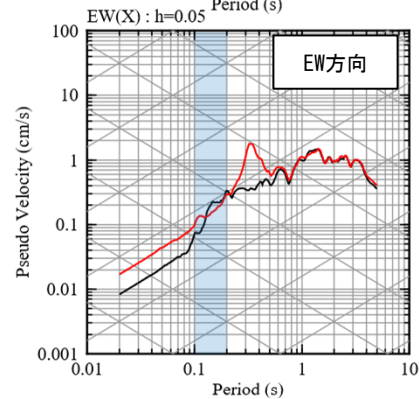
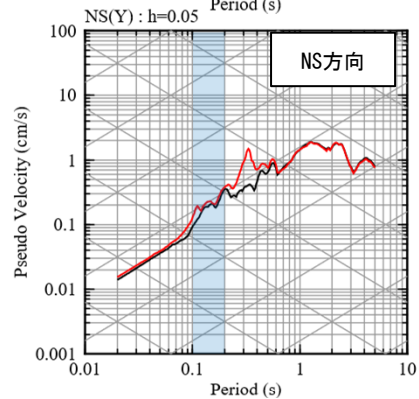
⑩ 熊本県熊本地方

現申請モデル



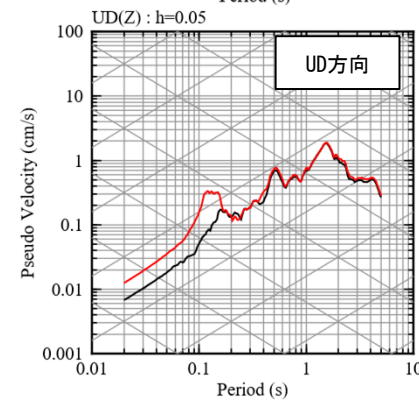
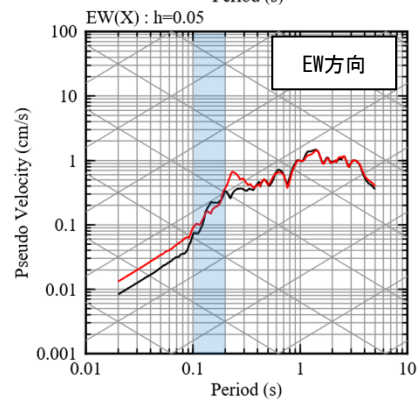
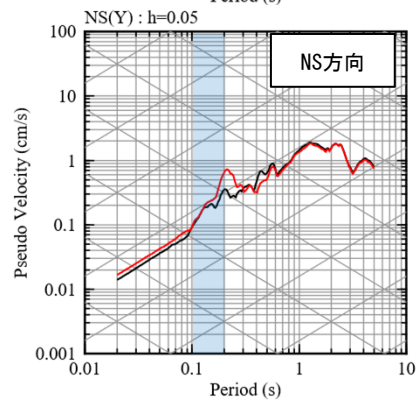
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



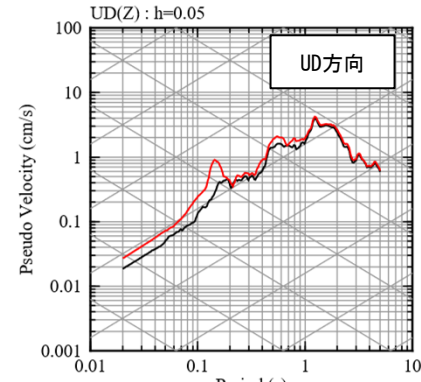
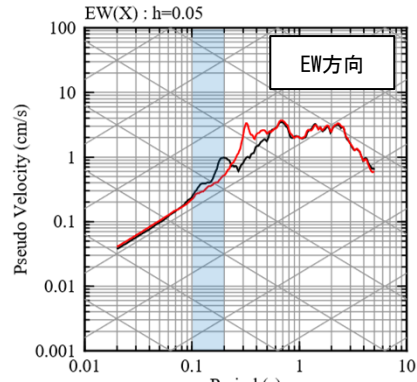
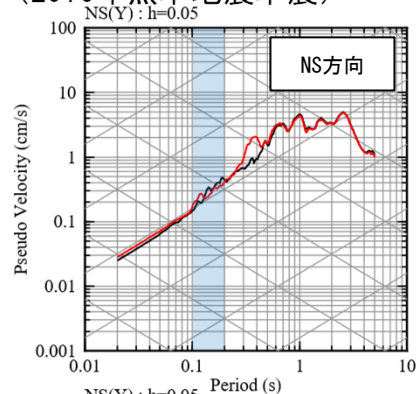
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (11/20)

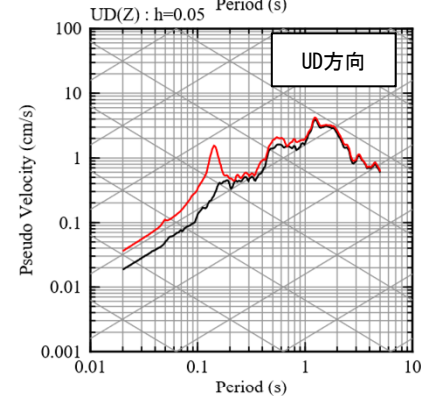
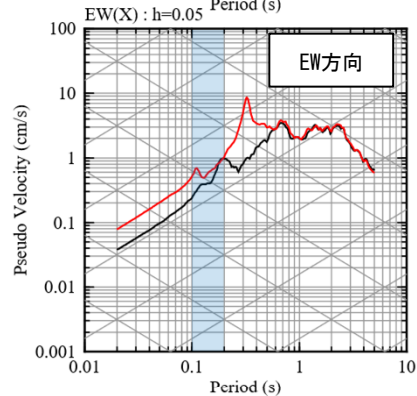
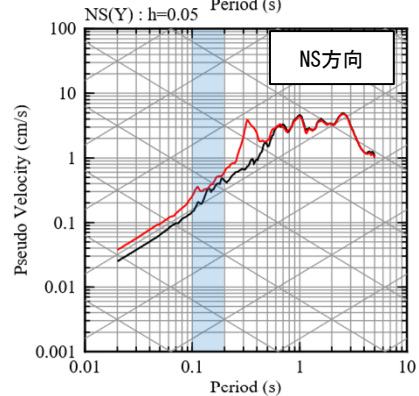
① 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)

現申請モデル



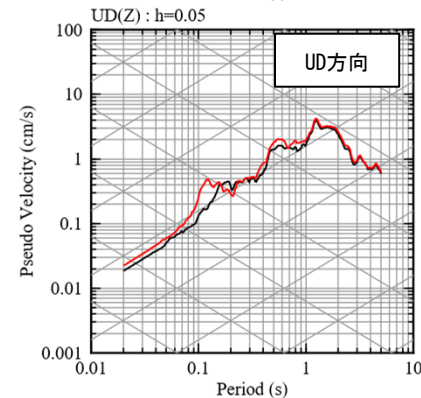
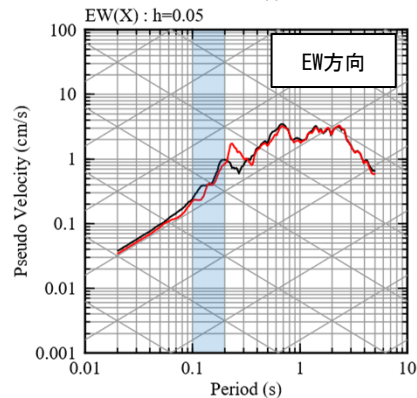
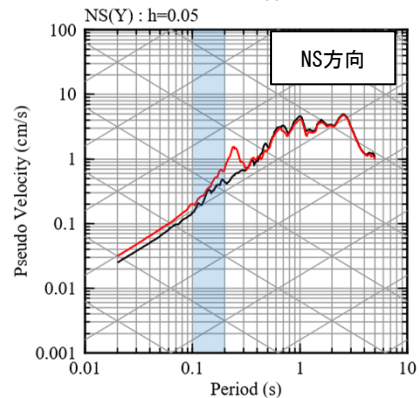
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



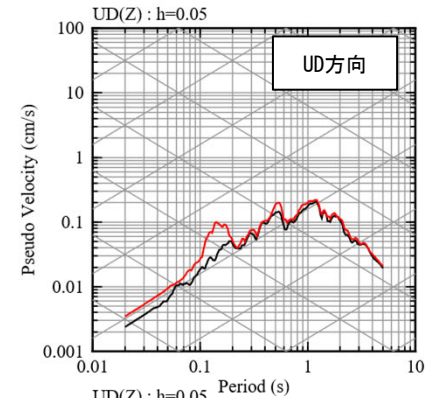
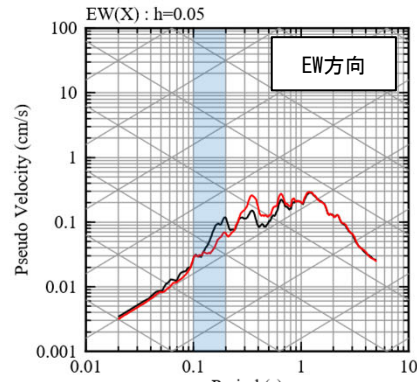
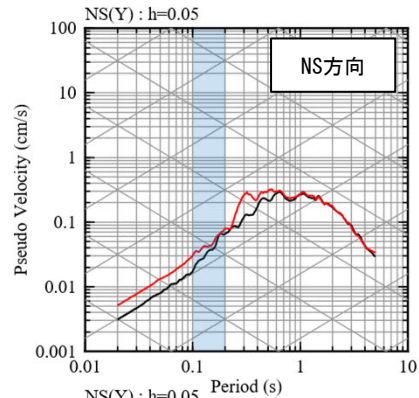
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (12/20)

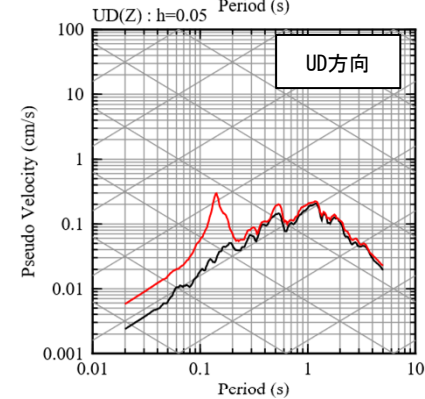
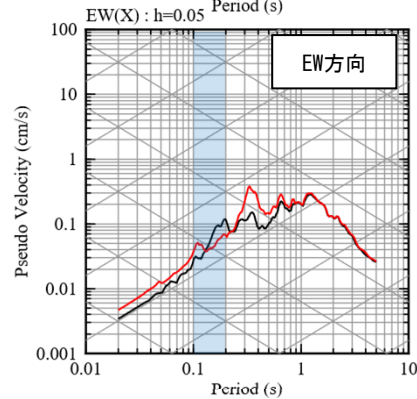
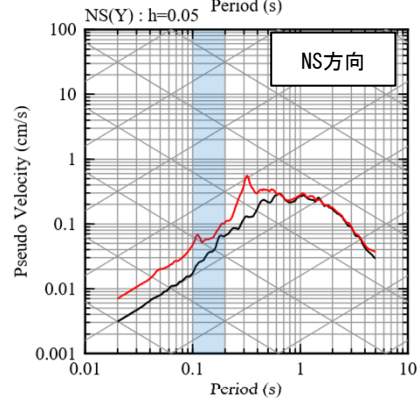
⑫ 熊本県熊本地方

現申請モデル



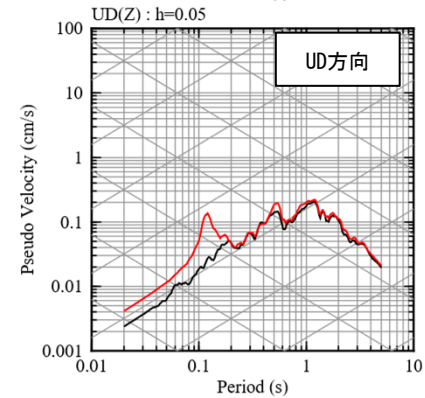
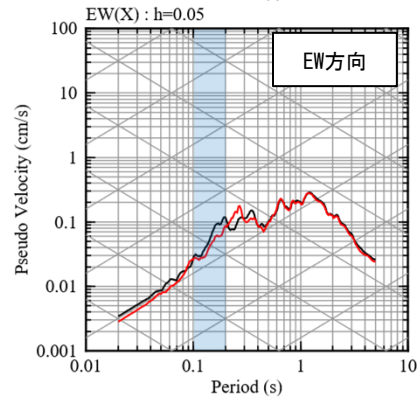
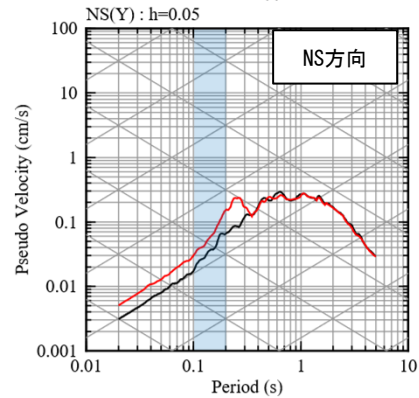
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



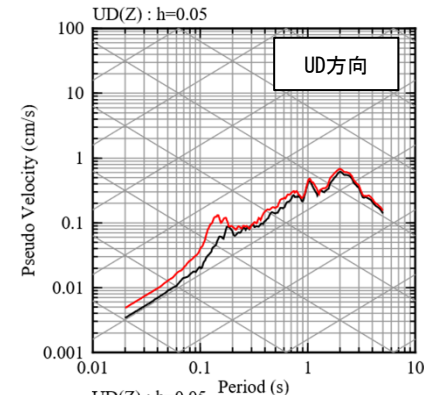
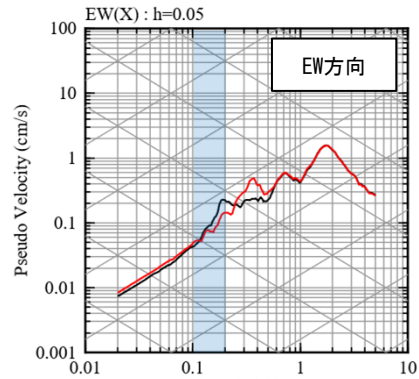
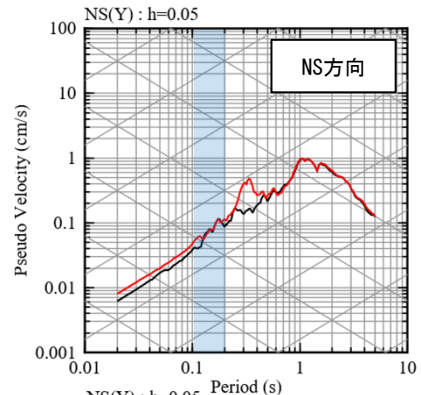
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (13/20)

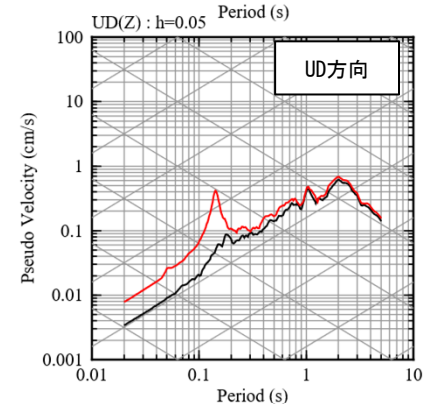
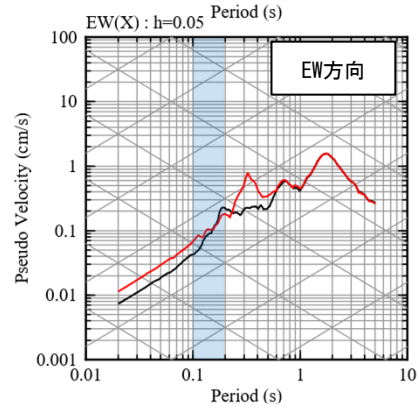
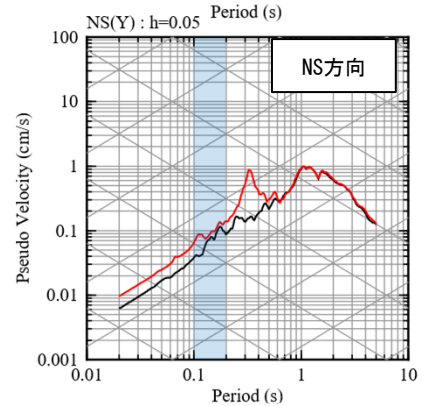
⑬ 熊本県熊本地方

現申請モデル



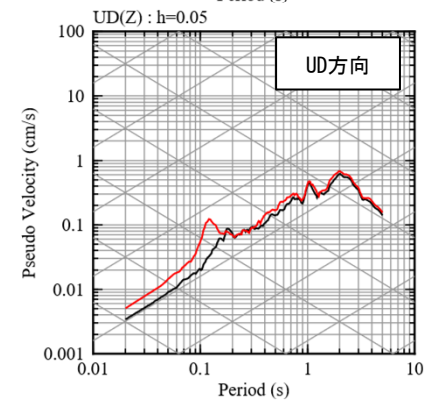
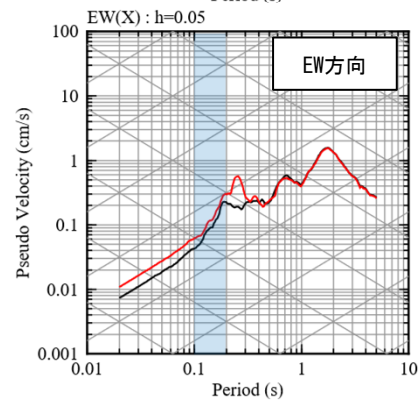
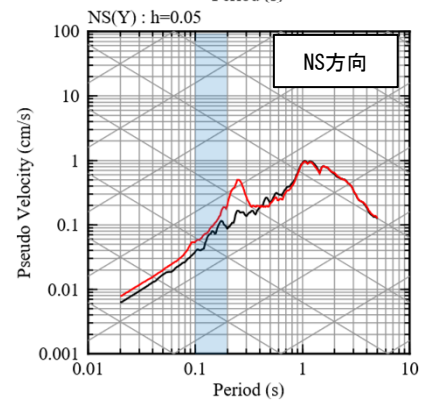
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



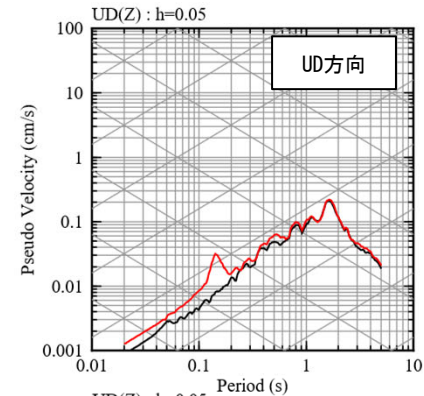
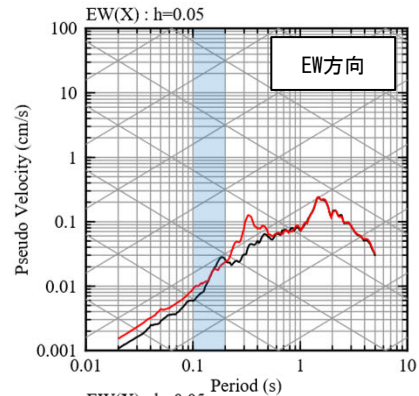
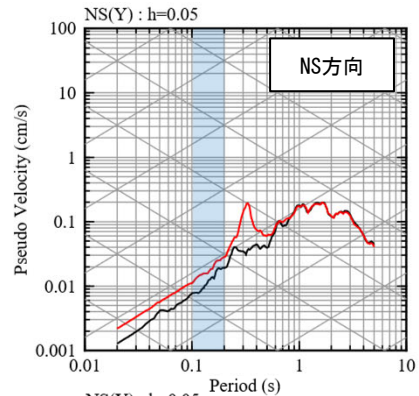
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (14/20)

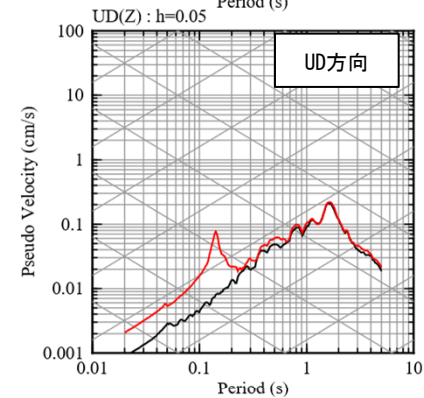
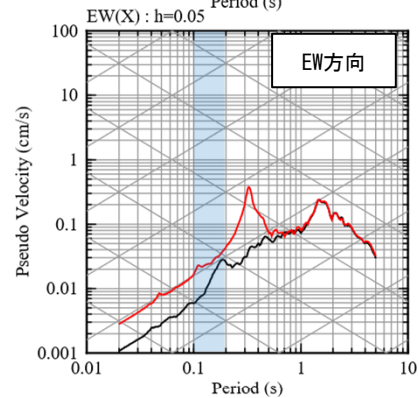
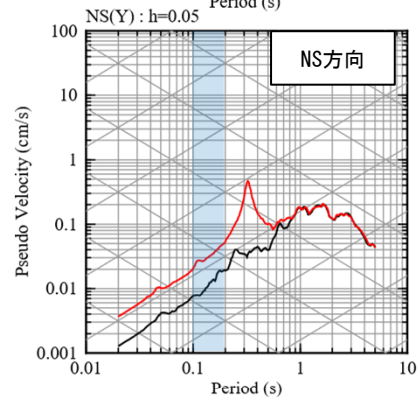
⑭ 熊本県阿蘇地方

現申請モデル



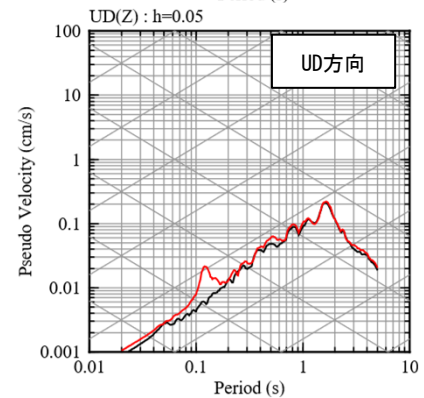
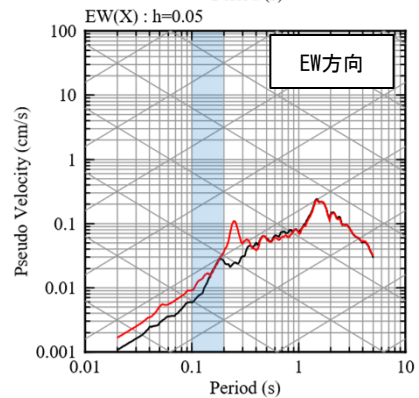
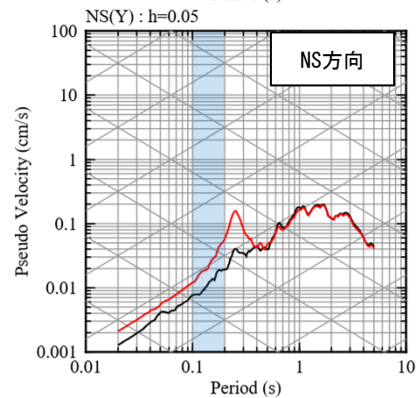
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



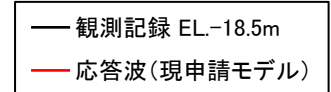
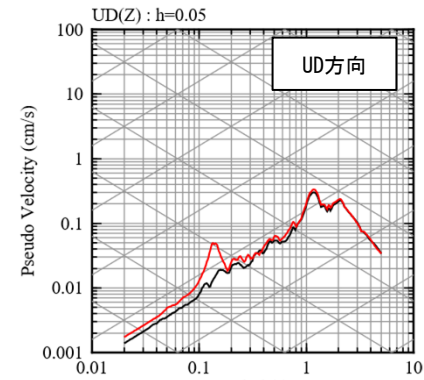
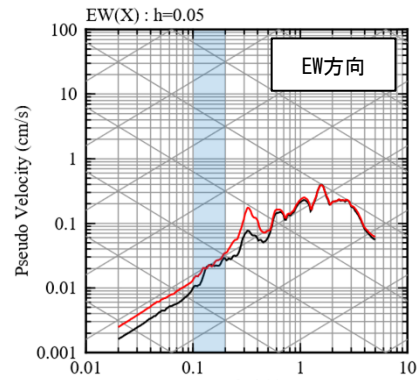
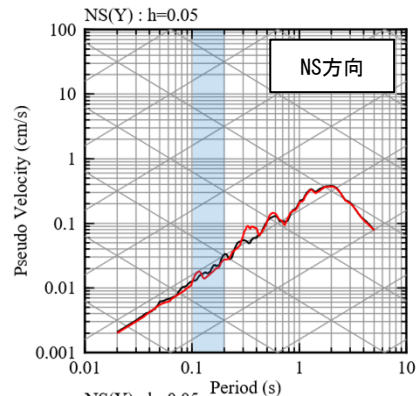
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

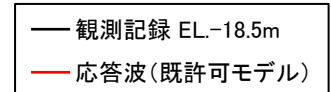
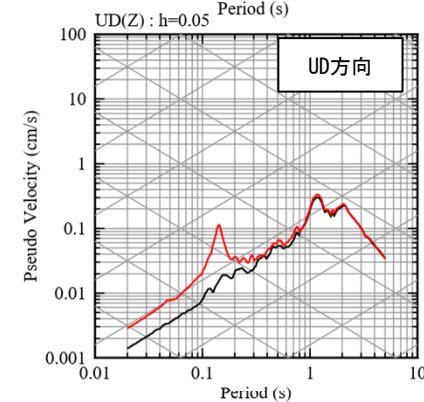
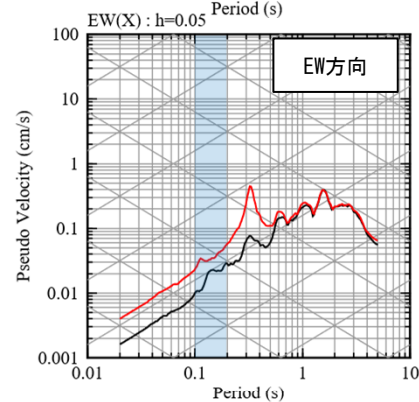
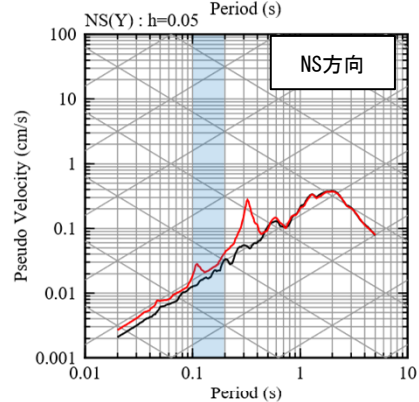
■ 応答スペクトルの比較結果 (15/20)

⑮ 熊本県阿蘇地方

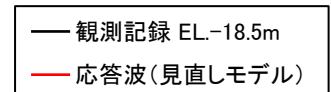
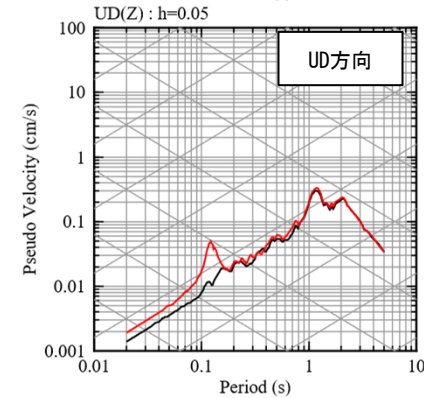
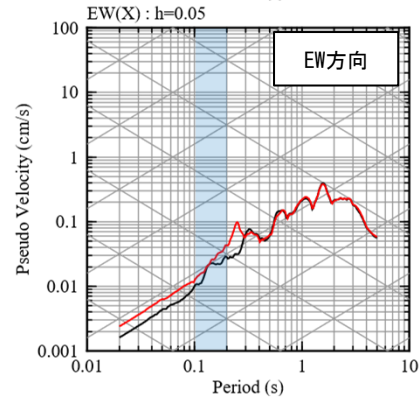
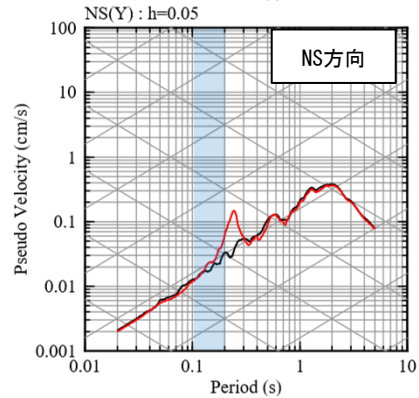
現申請モデル



既許可モデル



見直しモデル

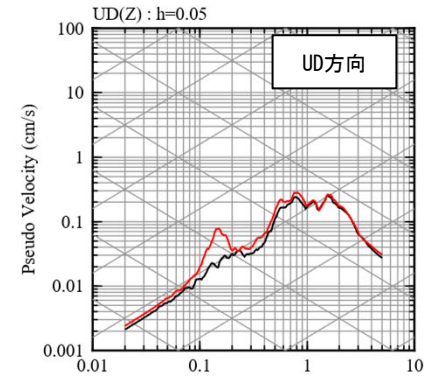
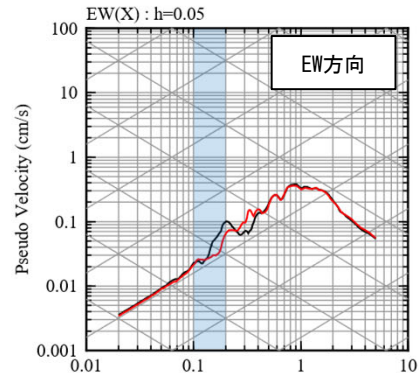
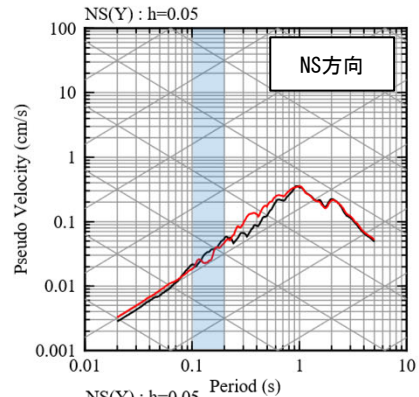


【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (16/20)

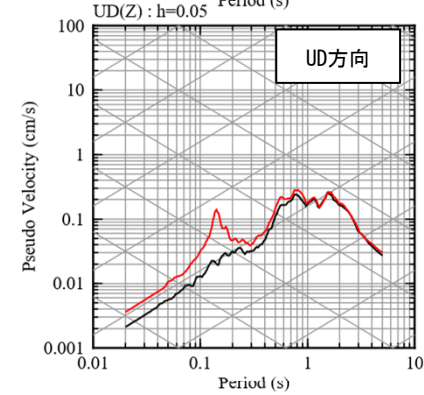
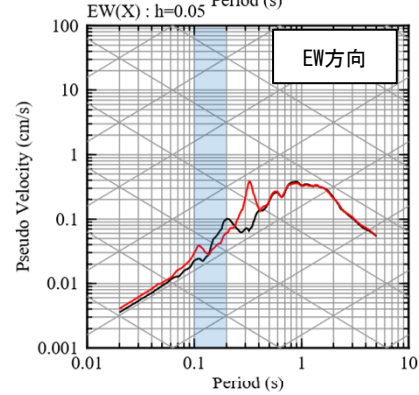
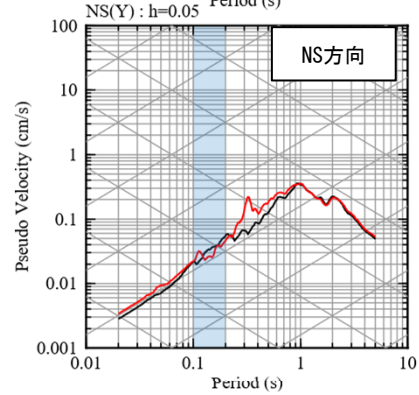
⑩ 熊本県熊本地方

現申請モデル



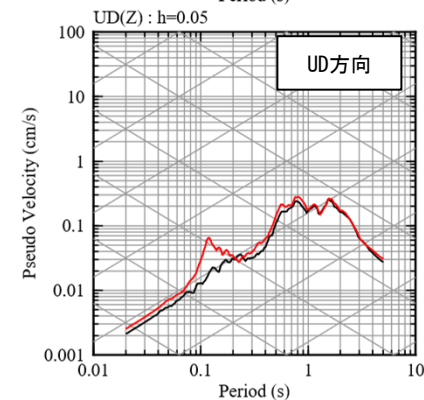
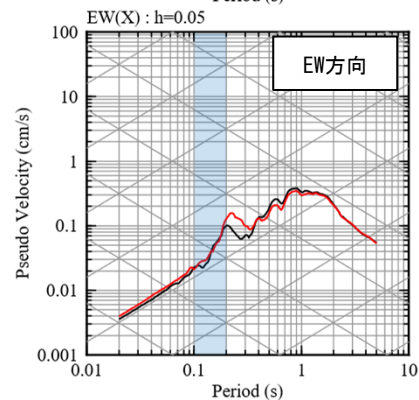
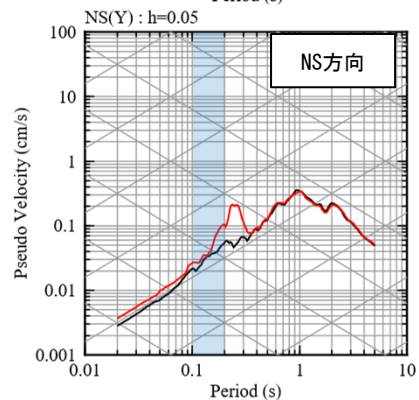
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



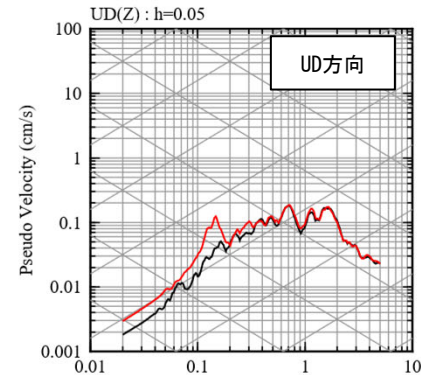
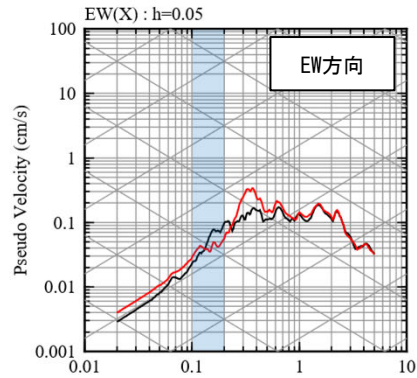
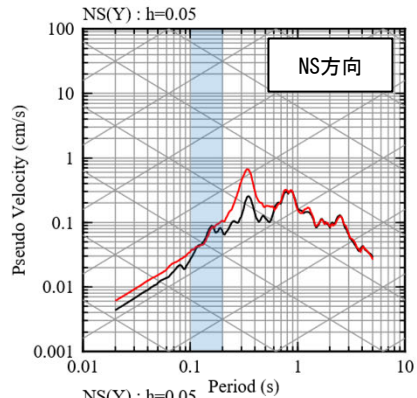
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (17/20)

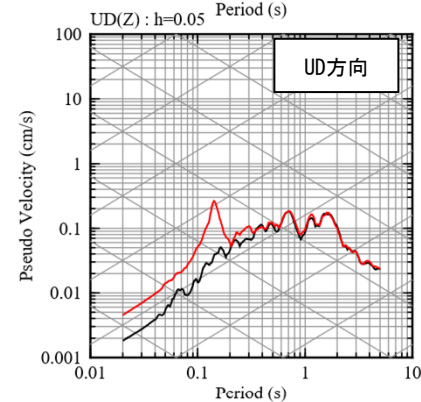
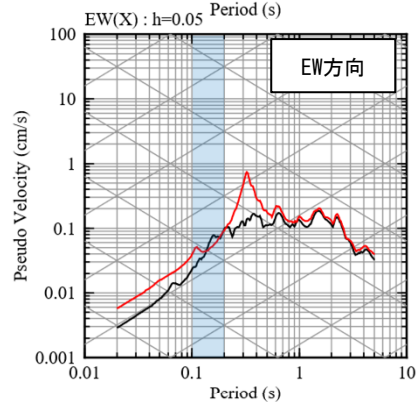
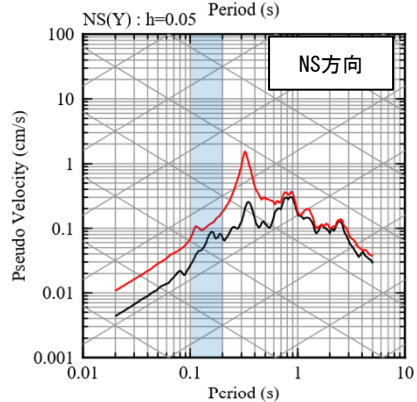
① 熊本県熊本地方

現申請モデル



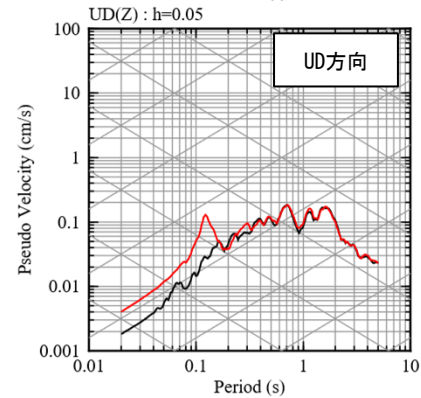
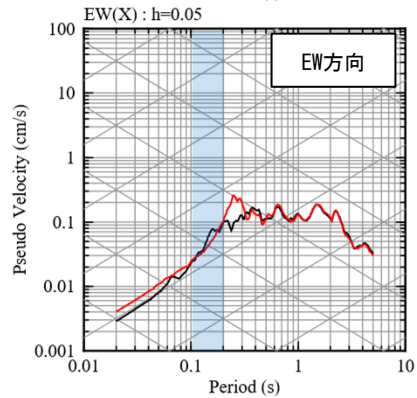
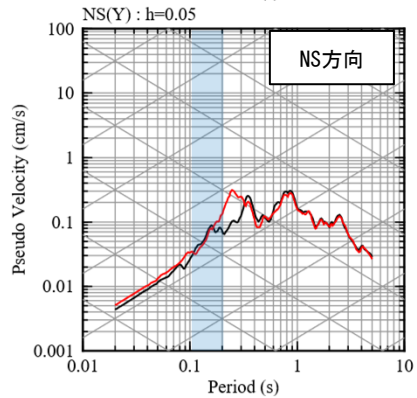
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



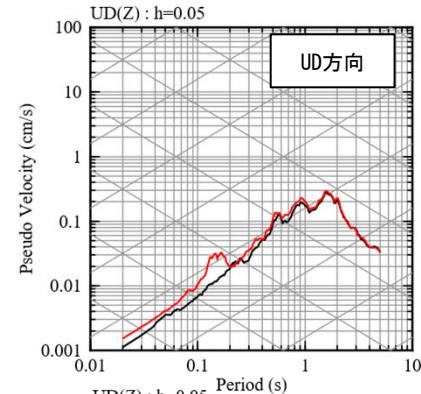
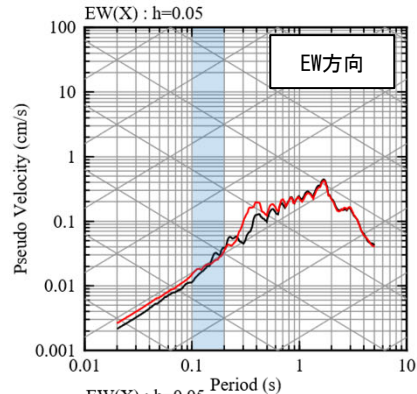
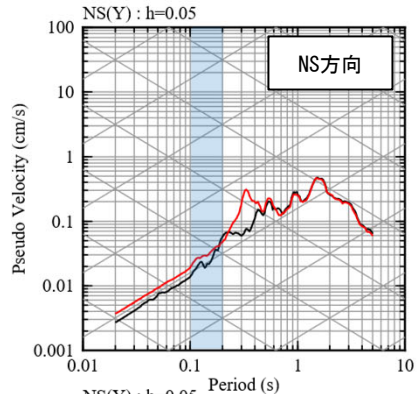
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (18/20)

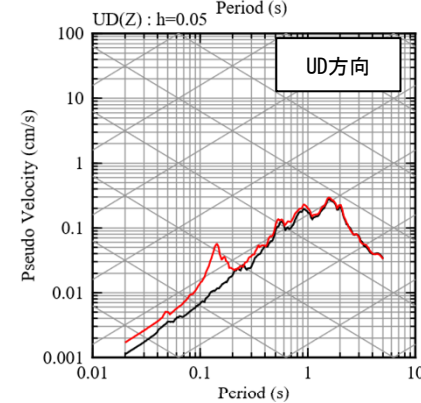
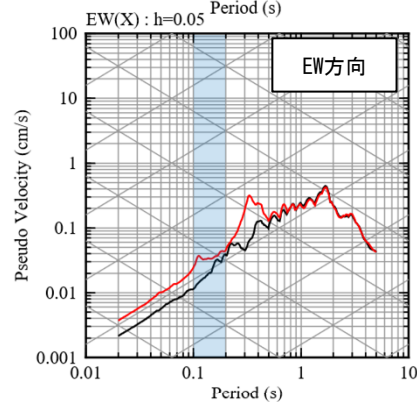
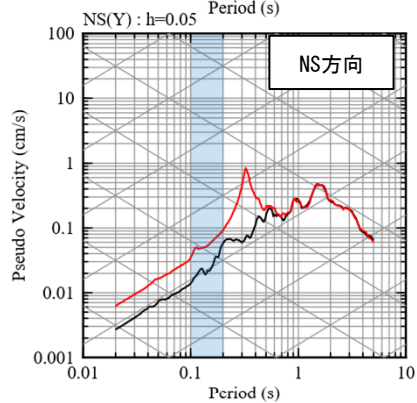
⑱ 熊本県阿蘇地方

現申請モデル



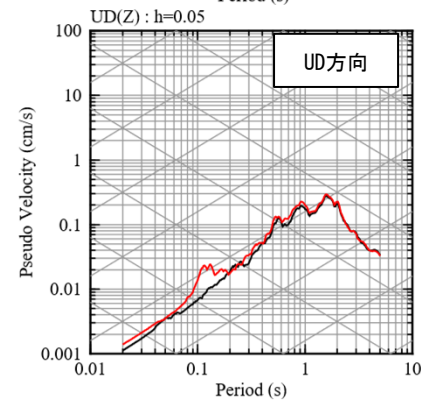
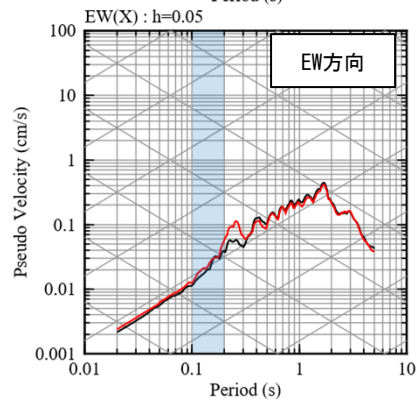
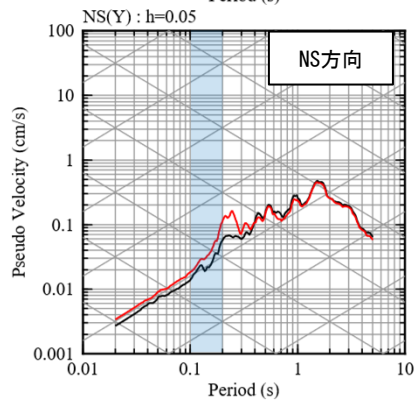
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



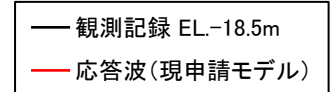
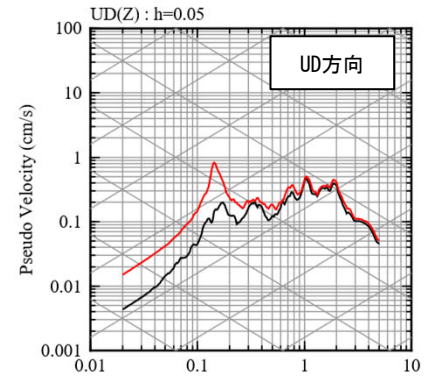
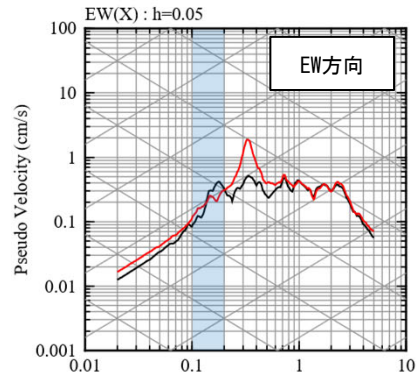
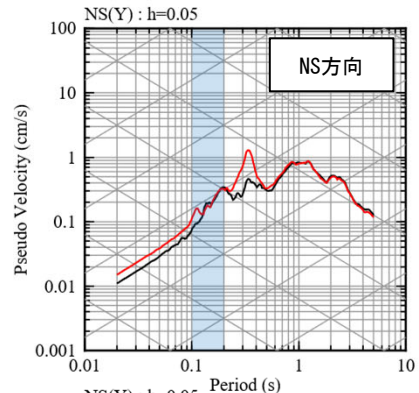
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)

【参考②】 応答スペクトルの比較結果

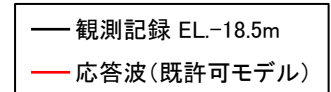
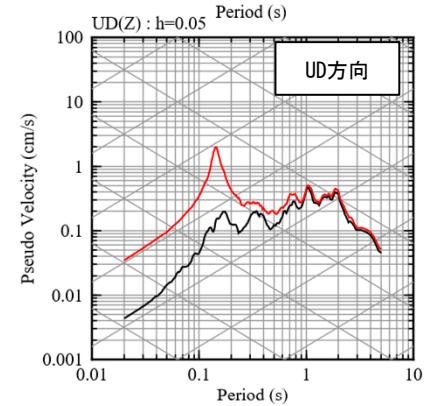
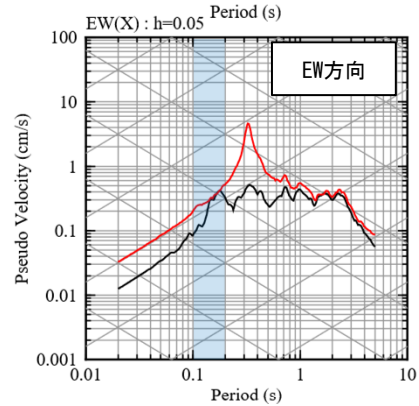
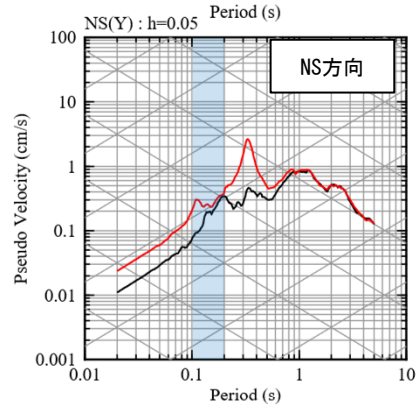
■ 応答スペクトルの比較結果 (19/20)

⑱ 熊本県熊本地方

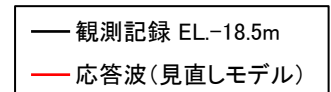
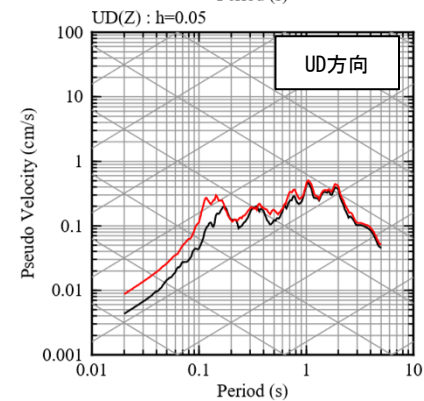
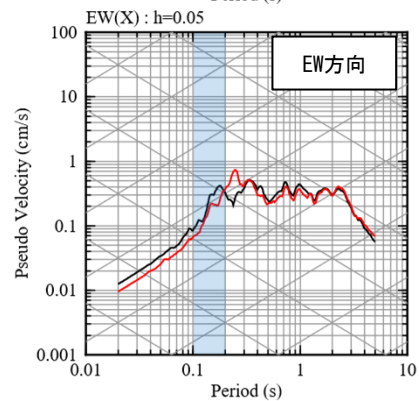
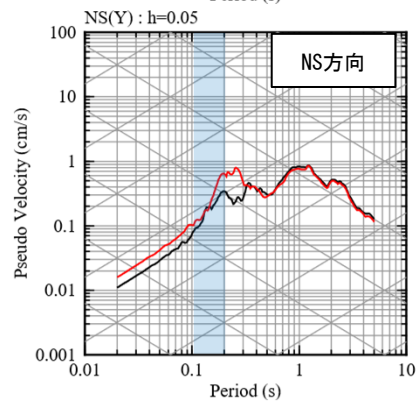
現申請モデル



既許可モデル



見直しモデル

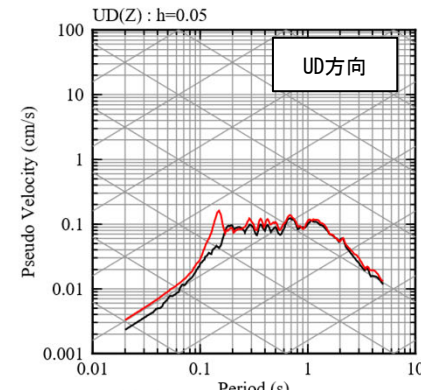
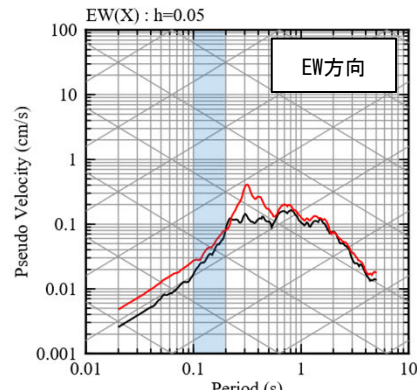
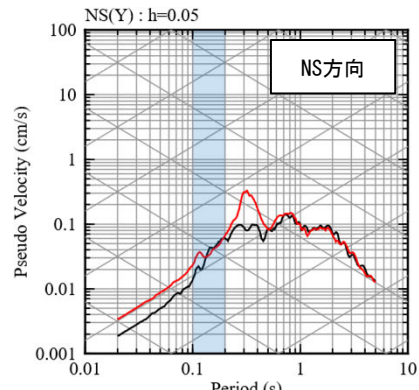


【参考②】 応答スペクトルの比較結果

■ 応答スペクトルの比較結果 (20/20)

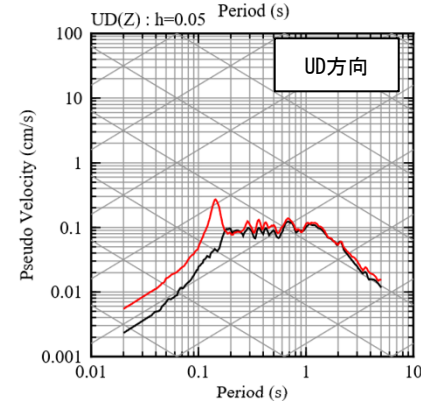
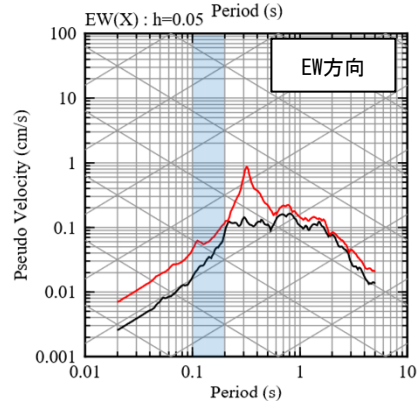
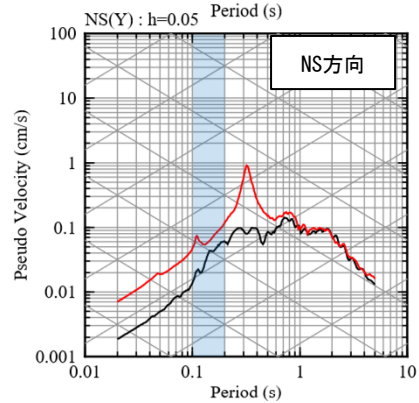
② 薩摩半島西方沖

現申請モデル



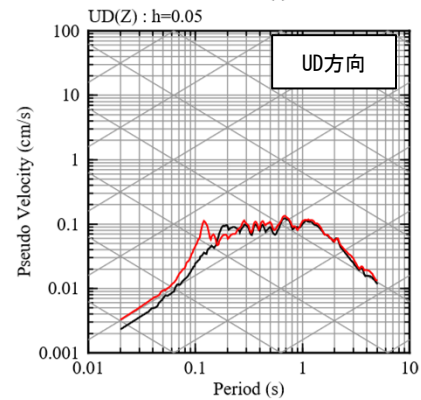
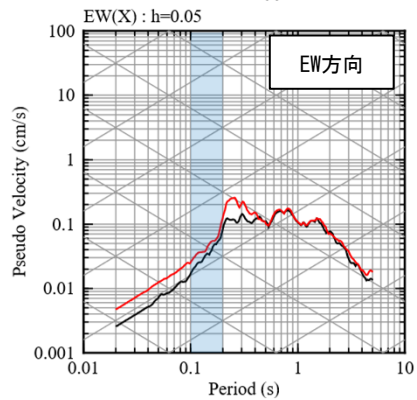
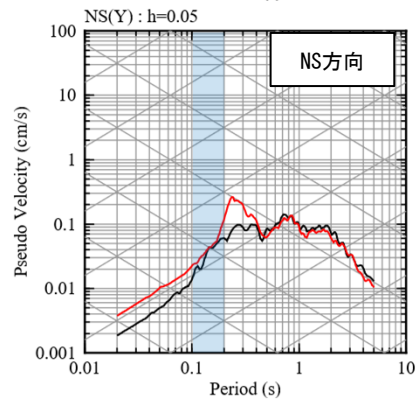
— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(現申請モデル)

既許可モデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(既許可モデル)

見直しモデル



— 観測記録 EL.-18.5m
— 応答波(見直しモデル)



【参考③】 既許可の地下構造モデル

【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデル

- 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る。

既許可における長周期帯の理論的手法に用いる一次元地下構造モデル

EL. 解放基盤表面	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
-18.5m	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結果 を基に設定	慣用値 (Vs/15~ Vs/10) を基に設定
-28.5m						上層の 岩石試験結果 を基に設定	鉛直アレイ及び微動アレイ の速度構造を基に設定	
-118.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100		微動アレイの速度構造 を基に設定	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200		宮腰ほか(2004) を基に設定	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	地震調査委員会(2003) を基に設定		
-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			

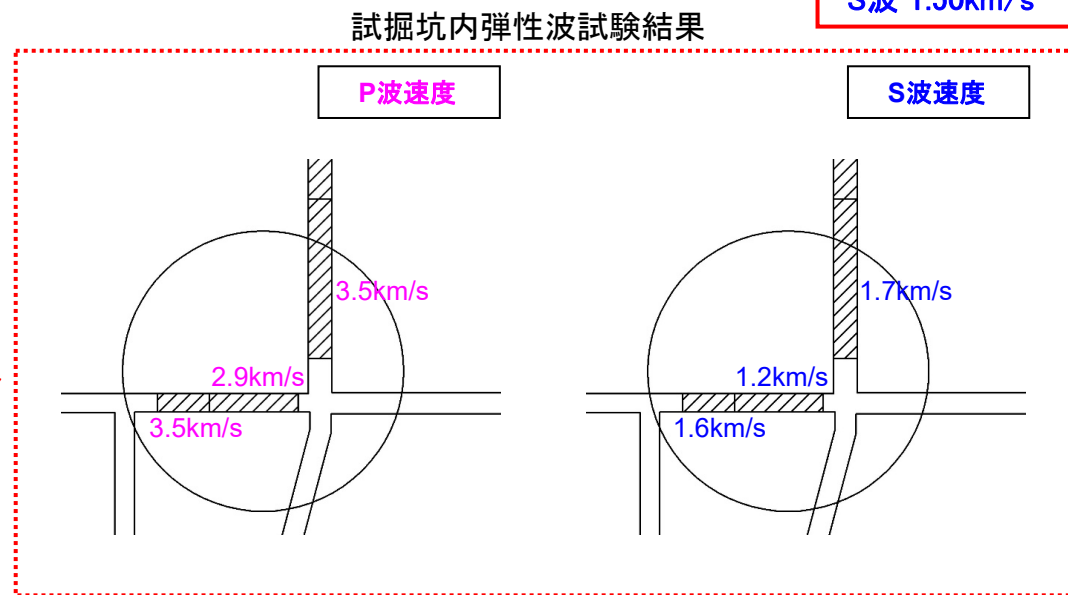
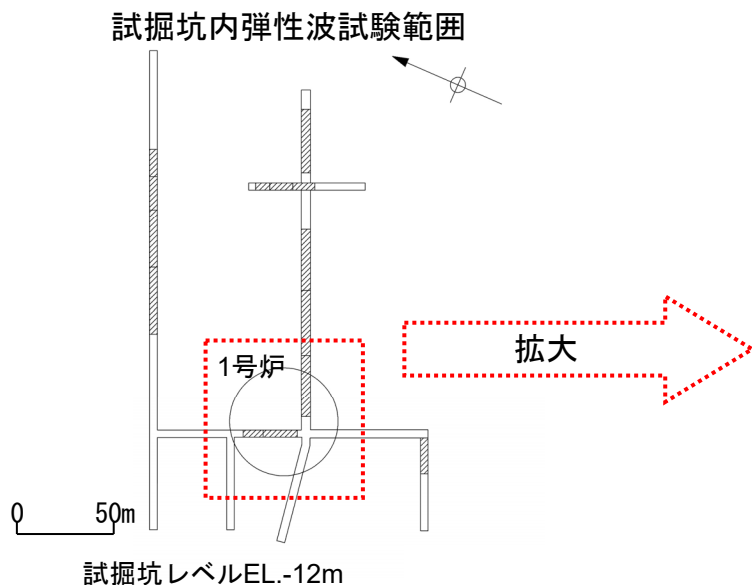
【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定（解放基盤表面EL. -18.5m ~EL. -28.5mまで）

EL.	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 -18.5m	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 結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~ Vs/10) を基に設定
-28.5m						上層の 岩石試験結果 を基に設定	鉛直アレイ及び微動アレイ の速度構造を基に設定	
-118.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100		微動アレイの速度構造 を基に設定	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200		宮腰ほか(2004) を基に設定	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	地震調査委員会(2003) を基に設定		
-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			

- P波速度及びS波速度は、炉心位置周辺における試掘坑弾性波試験結果の加重平均を基に設定。
- 密度 ρ は岩石試験結果を基に設定。
- 地盤減衰 (Q値) は慣用値 (Vs/15~Vs/10) を基に設定。

平均速度は、
P波 3.20km/s
S波 1.50km/s



【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -28.5~EL. -1018.5mまで)

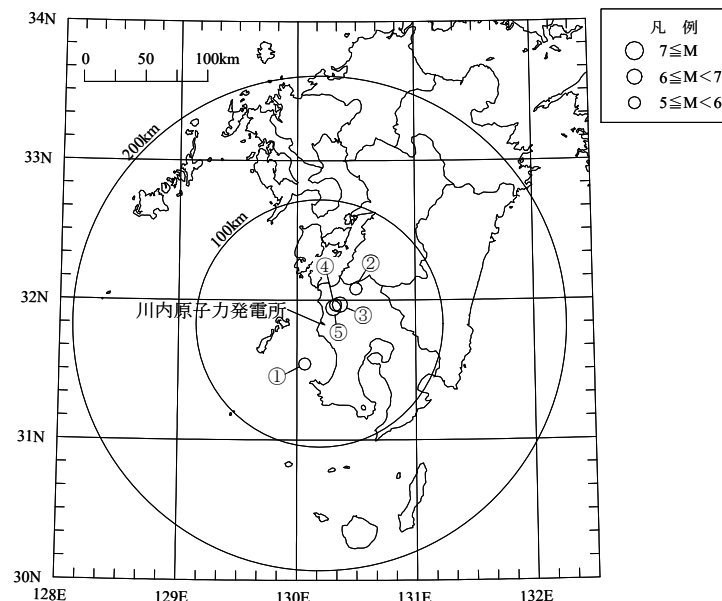
EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値	設定根拠		
						密度 ρ	Vs、Vp	Q 値
解放基盤表面								
-18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100	岩石試験結果を基に設定	試掘坑内弾性波試験結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~Vs/10) を基に設定
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	上層の岩石試験結果を基に設定	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定	
-118.5m	-0.462	2.70	2150	4400	200		微動アレイの速度構造を基に設定	
-480m	-1.0	2.70	3010	5200	200		宮腰ほか(2004)を基に設定	
-1018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	地震調査委員会(2003)を基に設定		
-2018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300			
-3018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500			
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500			

- EL. -28.5~EL. -118.5mまでのP波速度及びS波速度は、敷地における鉛直アレイ地震観測記録及び微動アレイ観測記録に基づく地盤同定による速度構造を基に設定。
- EL. -118.5~EL. -1018.5mまでのP波速度及びS波速度は、微動アレイ観測記録に基づく地盤同定による速度構造を基に設定。
- 密度 ρ は上層の岩石試験結果を基に設定。
- 地盤減衰 (Q値) は慣用値 (Vs/15~Vs/10) を基に設定。

◆ 敷地における鉛直アレイ地震観測記録に基づく地盤同定

検討対象地震の地震諸元

番号	地震名	発生日	M	深さ (km)	震央距離 (km)	備考
①	九州西側海域の地震	1984年8月15日	5.5	13.00	34	
②	鹿児島県北西部の地震	1994年2月13日	5.7	5.20	40	
③	鹿児島県北西部地震	1997年3月26日	6.6	11.85	22	本震
④	鹿児島県北西部地震	1997年4月3日	5.7	14.79	20	
⑤	鹿児島県北西部地震	1997年5月13日	6.4	9.24	17	本震



検討対象地震の震央位置

【参考③】既許可の地下構造モデル

- 敷地で観測された鉛直アレイ地震観測記録を用いた逆解析により、EL. 11.0m～EL. -118.5mまでのP波速度、S波速度及び地盤減衰（Q値）の同定を実施。
- 地盤同定にあたっては、遺伝的アルゴリズムを用い、各地震計観測点間の伝達関数を目的関数に設定。
- 検討対象地震は、敷地で観測された主な5地震を対象。

鉛直アレイ観測記録に基づく地盤同定結果

NS方向

層	層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	減衰	
				Q ₀	α
1	11.0	2.70	1.29	1.29	0.45
2	-18.5	2.70	1.78	1.47	0.45
3	-58.5	2.70	1.80	1.47	0.45

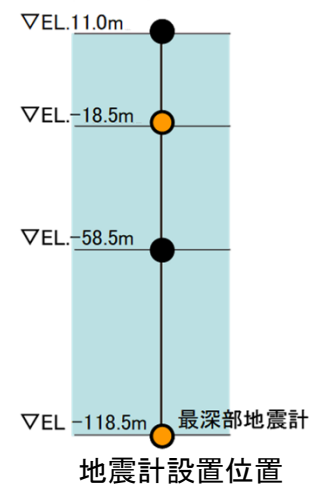
EW方向

層	層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	減衰	
				Q ₀	α
1	11.0	2.70	1.34	1.73	0.32
2	-18.5	2.70	1.60	1.85	0.32
3	-58.5	2.70	1.78	1.93	0.32

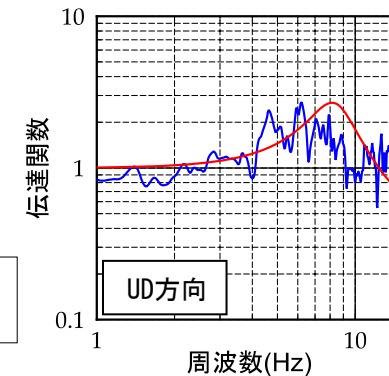
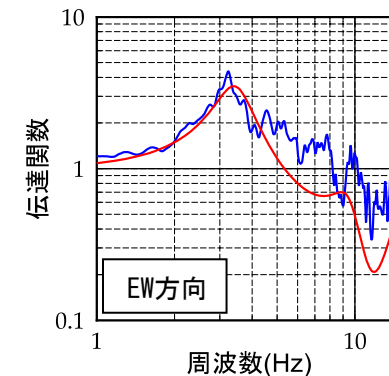
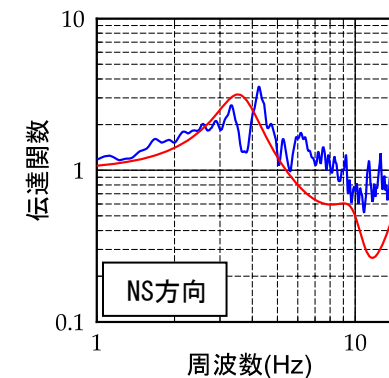
UD方向

層	層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (km/s)	減衰	
				Q ₀	α
1	11.0	2.70	3.05	0.70	0.48
2	-18.5	2.70	4.07	0.78	0.48
3	-58.5	2.70	4.11	0.78	0.48

$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$



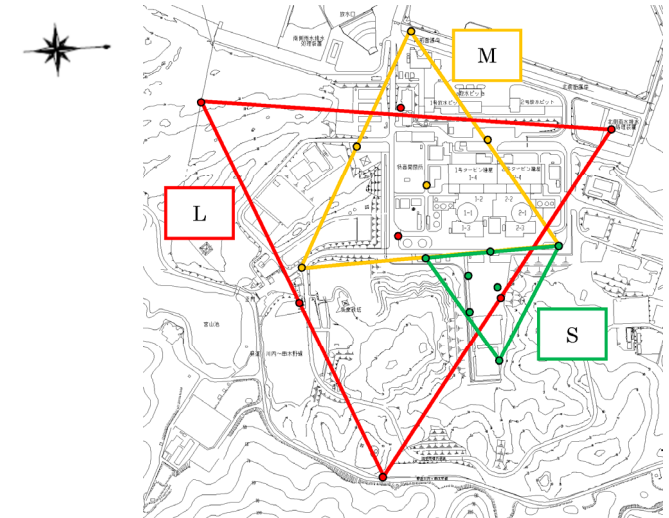
- 理論伝達関数(同定地下構造モデル)
- 地震観測記録による伝達関数



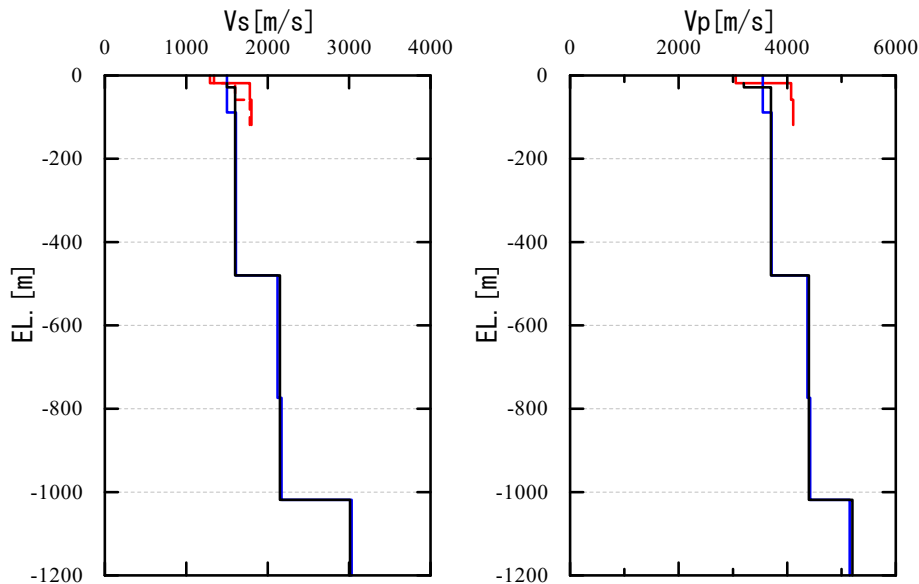
【参考③】既許可の地下構造モデル

◆微動アレイ観測記録に基づく地盤同定

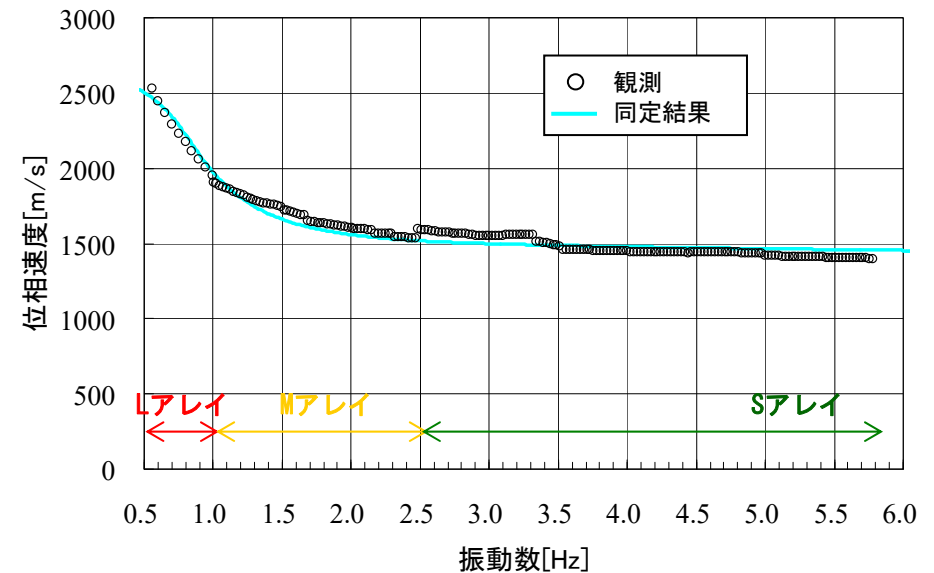
- 一辺が約930mのLアレイ、約570mのMアレイ、約280mのSアレイについて、それぞれの頂点3点、中点3点、重心位置の計7点で微動観測を実施。
- 微動観測から得られたそれぞれの分散曲線に対して、アレイサイズに応じた推定可能範囲により、Lアレイは0.45-1Hz、Mアレイは1-2.5Hz、Sアレイは2.5-5.8Hzの帯域を切り出して重ね合わせ、観測分散曲線を作成し、P波速度及びS波速度の同定を実施。



微動アレイ観測位置



伝達関数及び微動アレイによる同定結果



観測分散曲線と理論分散曲線

【参考③】既許可の地下構造モデル

◆ 鉛直アレイ地震観測記録及び微動アレイ観測記録に基づくP波速度及びS波速度の設定

- EL. -28.5m~EL. -118.5mは、鉛直アレイ地震観測記録及び微動アレイ観測記録による速度構造として設定する。
- EL. -118.5m~EL. -1018.5mは、微動アレイ観測記録による速度構造として設定する。

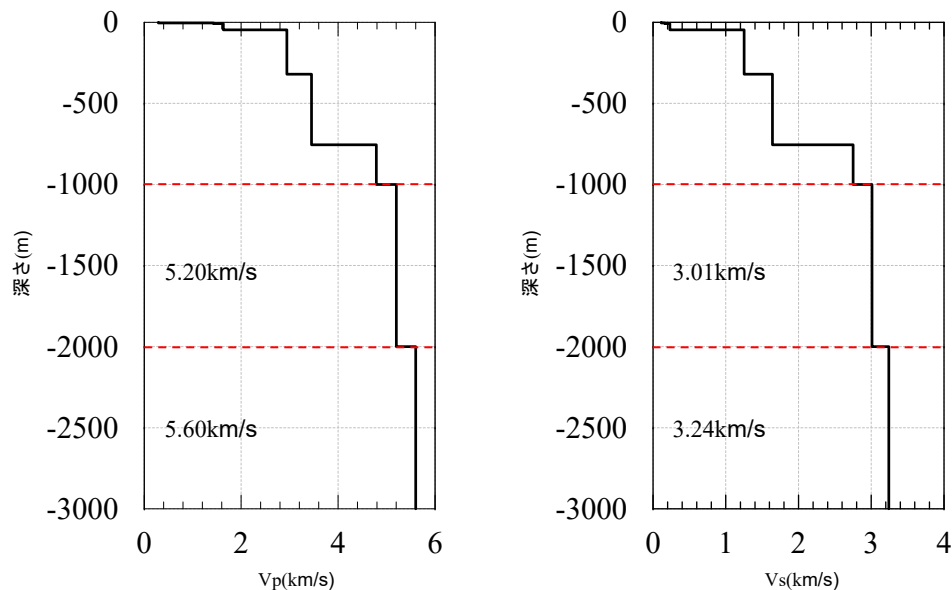
▽EL. 11m (GL=0m)	鉛直アレイ		微動アレイ		既許可地下構造モデル		
	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	
	2013年7月申請時の 地下構造モデル						
▽EL. -18.5m	Vs (km/s)	Vp (km/s)	1.34	3.05			
▽EL. -28.5m	1.50	3.20			1.50	3.20	試掘坑内弾性波試験
▽EL. -58.5m	2.15	4.25	1.60	4.07	1.50	3.55	
▽EL. -78.5m							・鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
▽EL. -118.5m			1.78	4.11		1.60	
▽EL. -480m	2.60	4.30			1.61	3.71	・微動アレイの結果を基に設定
▽EL. -773.5m					2.12	4.37	
▽EL. -1018.5m	2.75	4.79			2.15	4.40	
					2.17	4.42	

【参考③】既許可の地下構造モデル

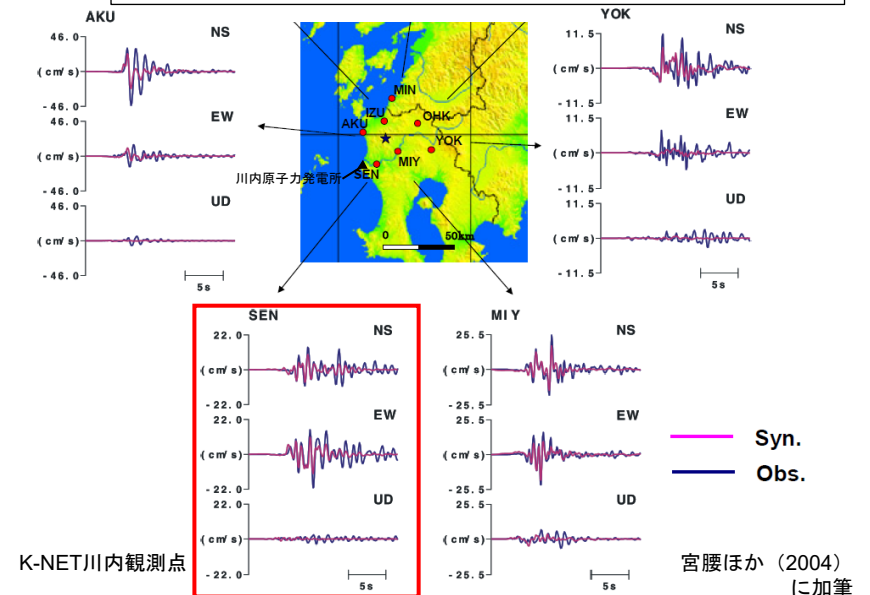
■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -1018.5~EL. -3018.5mまで)

EL.	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 -18.5m	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 結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~ Vs/10) を基に設定
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100	上層の 岩石試験結果 を基に設定	鉛直アレイ及び微動アレイ の速度構造を基に設定	
-118.5m	-0.462	2.70	2150	4400	200		微動アレイの速度構造 を基に設定	
-480m	-1.0	2.70	3010	5200	200	宮腰ほか(2004) を基に設定		
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300	地震調査委員会(2003) を基に設定		
-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			

- P波速度及びS波速度は、宮腰ほか(2004)を基に設定。
 - 宮腰ほか(2004)では、中規模地震(1997年3月26日鹿児島県北西部地震余震)のK-NET観測記録をもとに、R/Vレーシバ関数を用い、K-NET観測地点の地下構造モデルを推定している。
 - 敷地から最も近いK-NET川内観測点で推定された速度構造を用いる。
- 密度 ρ は上層の岩石試験結果を基に設定。
- 地盤減衰(Q値)は慣用値(Vs/15~Vs/10)を基に設定。



宮腰ほか(2004)により推定された地下構造モデル(K-NET川内観測点)



1997年3月26日鹿児島県北西部地震におけるK-NET観測記録と震源インバージョンの震源モデルによる計算結果

【参考③】既許可の地下構造モデル

■ 既許可の地下構造モデルの設定 (EL. -3018.5m以深)

EL. 解放基盤表面	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
-18.5m	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 結果を基に設定	慣用値 (Vs/15~ Vs/10) を基に設定
-28.5m						上層の 岩石試験結果 を基に設定	鉛直アレイ及び微動アレイ の速度構造を基に設定	
-118.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100		微動アレイの速度構造 を基に設定	
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200		宮腰ほか(2004) を基に設定	
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200	地震調査委員会(2003) を基に設定		
-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			

- P波速度、S波速度及び密度は、地震調査委員会(2003)を基に設定。
 - 地震調査委員会(2003)では、布田川・日奈久断層帯の地震を想定した地震動評価を実施しており、地震基盤以深の地下構造モデルが示されている。
- 地盤減衰(Q値)は慣用値(Vs/15~Vs/10)を基に設定。



地震基盤以深の各層のモデルパラメータ

名称	上面深度 (km)	層厚 (km)	S波速度 (km/s)	P波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)	Q
上部地殻	3	14	3.5	5.9	2.70	300
下部地殻	17	16	3.8	6.6	3.00	500
上部 マントル	33	∞	4.3	7.6	3.30	500

※地震調査委員会(2003)に加筆

【参考③】既許可の地下構造モデル

■鉛直アレイによる既許可の地下構造モデルの確認

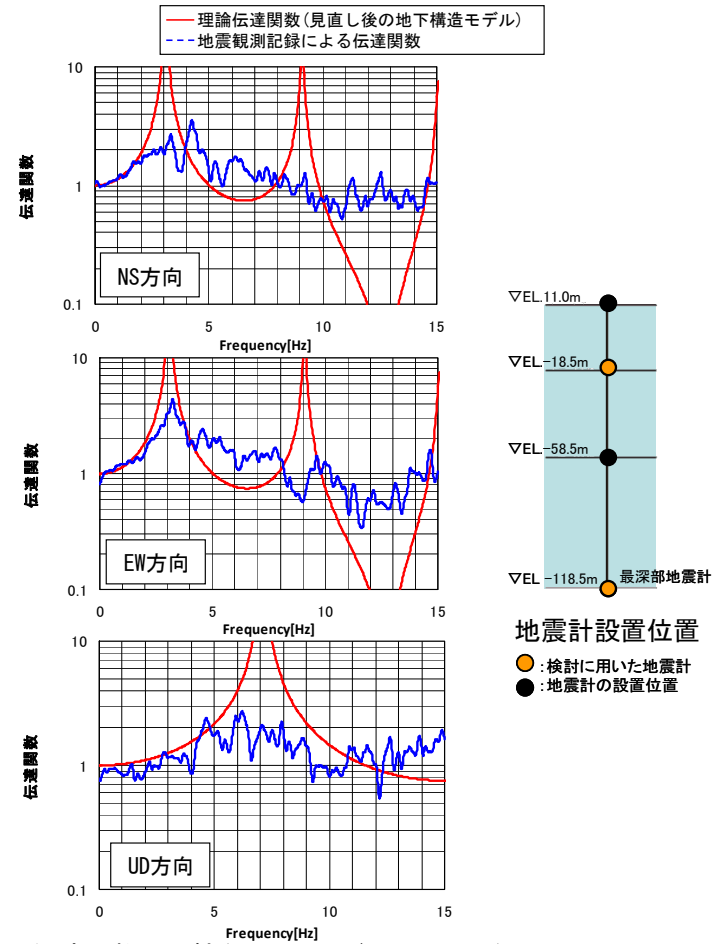
第114回審査会合資料より抜粋

■ 見直し後の地下構造モデルから算出した伝達関数は、鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数及び地震観測記録から同定された地下構造による理論伝達関数とほぼ整合していることを確認した。

地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Q値
11.0m	0	2.7	1.50	3.20	100
-18.5m	1	2.7	1.50	3.20	100
-28.5m	2	2.7	1.60	3.70	100
-118.5m					

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加



伝達関数の比較 (EL. -18.5m/EL. -118.5m)

【参考③】 既許可の地下構造モデル

■ 微動アレイによる既許可の地下構造モデルの確認

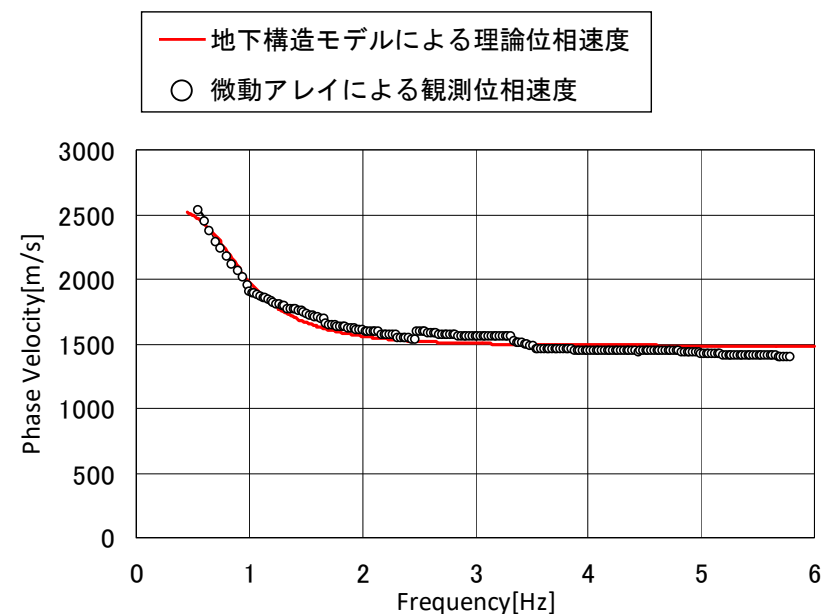
第114回審査会合資料より抜粋

■ 見直し後の地下構造モデルを基に、レイリー波の理論位相速度を算出し、微動アレイ探査結果から得られた観測位相速度と比較すると、両者はおおむね一致することを確認した。

地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Q値
11.0m	0	2.7	1.50	3.20	100
-18.5m	1	2.7	1.50	3.20	100
-28.5m	2	2.7	1.60	3.70	100
-480m	3	2.7	2.15	4.40	200
-1018.5m	4	2.7	3.01	5.20	200

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加



理論位相速度と観測位相速度の比較

【参考④】 ボーリング孔内Q値に関する知見

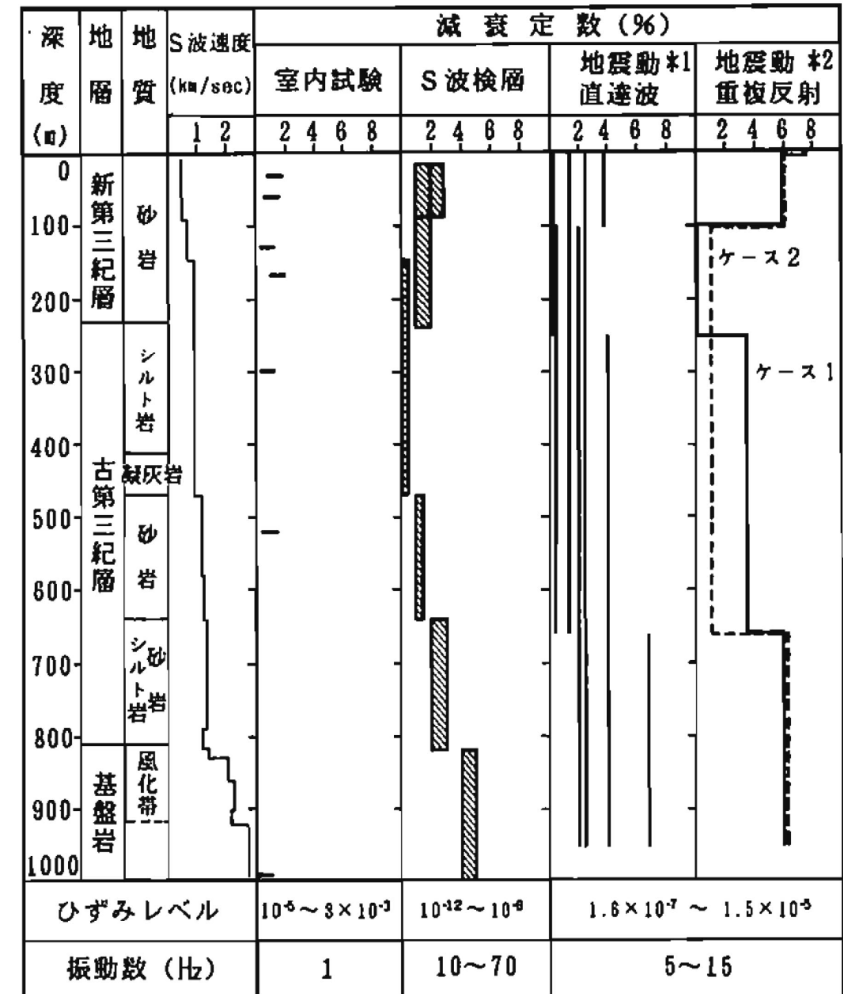
【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

文献	概要
石田ほか(1987) ¹¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ S波検層による方法は、比較的純粋なSH波を発生させることができるが、一般に地震時に比べて、ひずみレベルが小さく、卓越振動数が高くなるという問題がある。 ・ 観測地震動を用いる方法は、地盤の地震応答解析を行なうときと同様の条件下で減衰性を評価できるという有利さはあるものの、地盤内での地震波動の伝播が非常に複雑であるため、観測地震動が解析の際に仮定した条件に適合するかどうか問題である。 ・ S波検層と観測地震動の解析との関係は、ひずみレベルや振動数成分が異なるにも拘わらず、両者の全体の傾向は良く整合している。
小林ほか(2010) ¹²⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ Q値測定は対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、且つひずみレベルが小さいという理解もあって、得られた減衰定数が地震動評価（耐震設計）に使われることはそう多くないのが現状。 ・ PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される減衰定数において、信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差、あるいはひずみレベルの違いによる差はほとんどない結果が示された。
小林ほか(2013) ¹³⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ PS検層は地表人工震源による弾性波動を扱っていることから対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、周波数帯域の違いによる適用上の問題から、PS検層により得られたS波の減衰特性が地震動評価に使われることはそう多くはない。 ・ 鉛直アレー観測及びPS検層から評価されるS波の減衰定数は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側でほぼ一致し、評価手法の違いによる差はほとんどないことが示された。
佐藤(2010) ¹⁴⁾	<ul style="list-style-type: none"> ・ PS検層による減衰定数は、スペクトル比の逆解析により得られた同定結果の下限値の周波数軸上の延長上に位置しており、両者が減衰定数の下限値において良く対応していることが分かる。 ・ バイリニア型の周波数依存モデルの妥当性と高周波数側への拡張性、ならびにPS検層によって減衰定数の下限値を推定できる可能性を示している。

【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 石田ほか(1987)¹¹⁾の概要

- 同一地点に対する室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰性の評価手法を示し、それらの結果の比較考察を実施。
- 観測地震動を用いる方法は、地盤の地震応答解析を行なうときと同様の条件下で減衰性を評価できるという有利さはあるものの、地盤内での地震波動の伝播が非常に複雑であるため、観測地震動が解析の際に仮定した条件に適合するかどうかの問題である。
- S波検層と観測地震動の解析との関係は、ひずみレベルや振動数成分が異なるにも拘わらず、両者の全体の傾向は良く整合している。S波検層で発生する波と地震動とは、地盤内での波の伝播の状況が対照的であり、両者のデータを用いて地盤の減衰を評価する方法は互いに弱点を補い合う関係にあるべきものと考えられる。



*1) 各観測点間ごとの値を示す

*2) 層分割の異なる2つの最適モデルを示す。

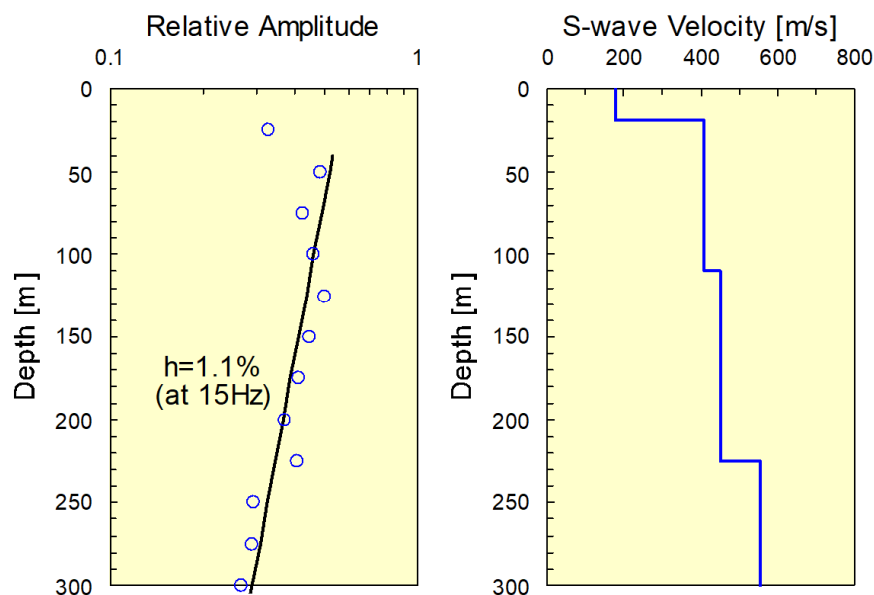
各種の手法による減衰定数の比較

石田ほか(1987)より抜粋

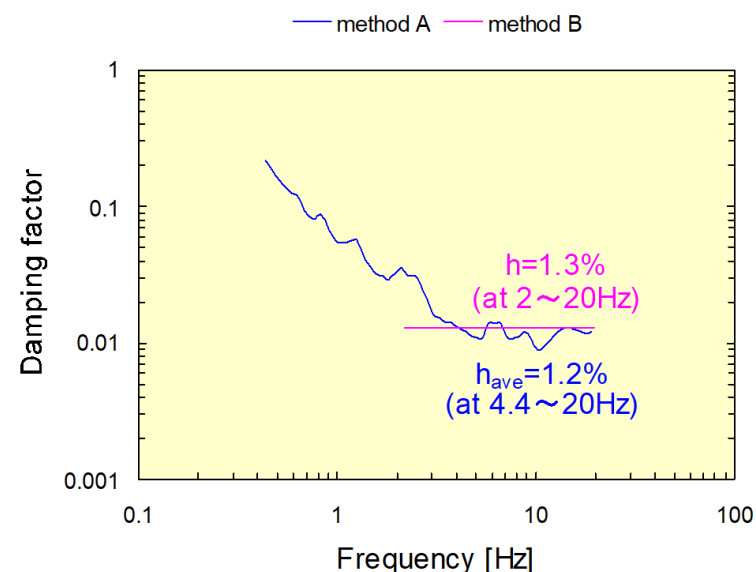
【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 小林ほか(2010)¹²⁾の概要

- Q値測定は対象の周波数が数10Hz以上と実地震動のそれに比べて高く、且つひずみレベルが小さいという理解もあって、得られた減衰定数が地震動評価（耐震設計）に使われることはそう多くないのが現状。
- 防災科学技術研究所の基盤強震観測網（KiK-net）成田観測点を事例対象として、（PS検層による）Q値測定と鉛直アレー観測から評価されるS波の減衰定数の関係性を数値実験及び実データから検討。
- 成田観測点において、PS検層記録と鉛直アレー観測記録に基づき評価される15Hzにおける減衰定数は共に同程度の値（等価減衰定数1.1～1.3%）を有する。
- PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される減衰定数において、信頼性のある同一周波数帯のS波に着目した場合、評価手法の違いによる差、あるいはひずみレベルの違いによる差はほとんどない結果が示された。このことは、Q値測定により得られる地盤の減衰定数が地震動評価に適用できることを示唆している。



成田観測点のQ値解析結果及びS波速度構造



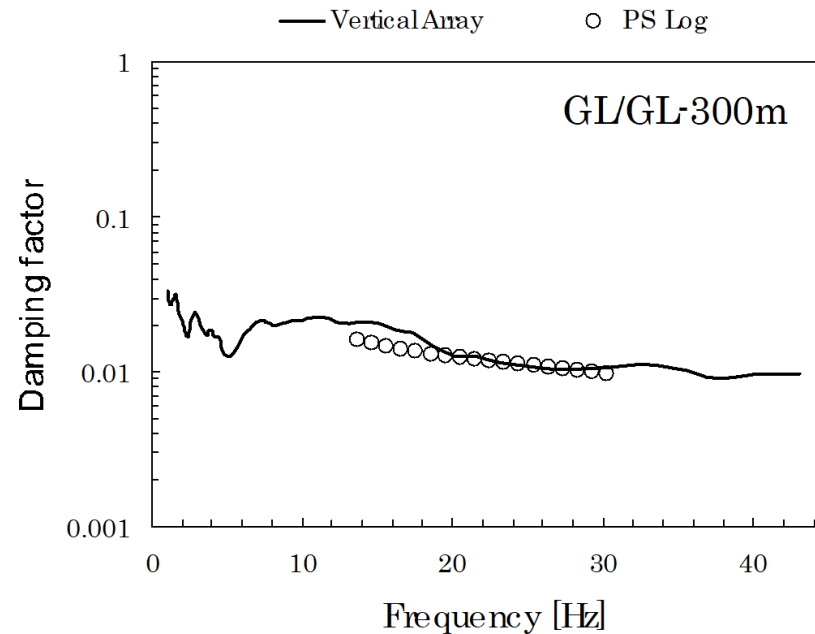
成田観測点の地盤同定解析結果

小林ほか(2010)より抜粋

【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 小林ほか(2013)¹³⁾の概要

- ほぼ水平な地質構造を持つ第四紀地盤テストフィールドにおいて、PS検層（ダウンホールPS検層）に基づく減衰定数の評価に関する実証試験を実施。
- 実証試験では、主として鉛直アレー観測による減衰定数の評価結果に対比させる形でPS検層の適用性を検討。
- 両手法から評価されるS波の減衰定数は、PS検層が適用対象とするおよそ10Hzより高周波数側でほぼ一致し、評価手法の違いによる差はほとんどないことが示された。

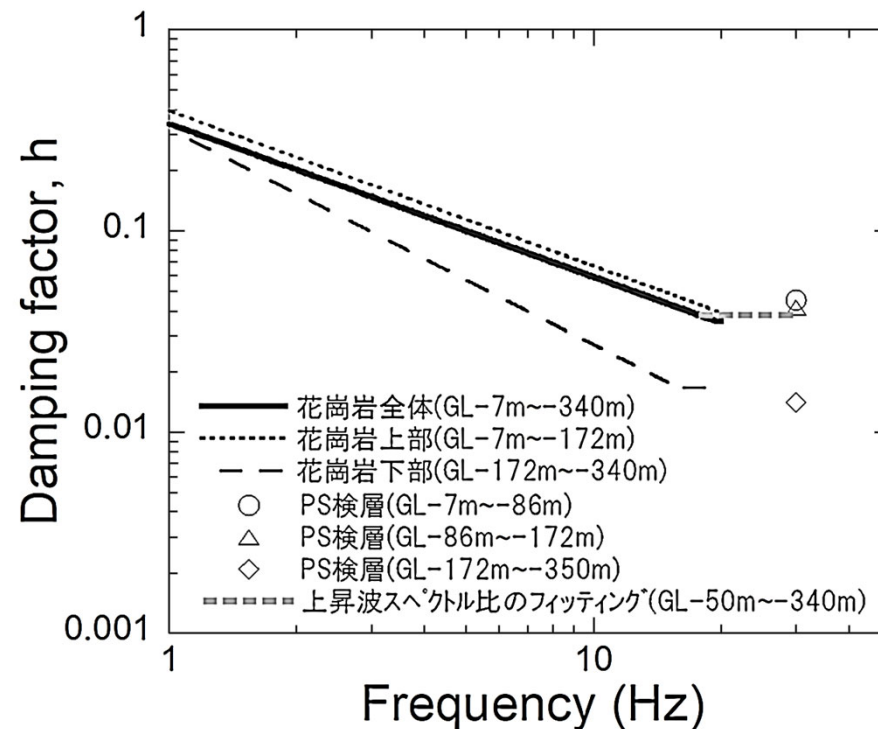


PS検層及び鉛直アレー記録に基づき推定された
S波の減衰定数の比較

【参考④】ボーリング孔内Q値に関する知見

■ 佐藤 (2010)¹⁴⁾ の概要

- 花崗岩からなる硬質岩盤において鉛直アレイ観測とPS検層により得られるS波の減衰定数を比較検討。
- PS検層による減衰定数は、スペクトル比の逆解析により得られた同定結果の下限値の周波数軸上の延長上に位置しており、両者が減衰定数の下限値において良く対応していることが分かる。このことは、バイリニア型の周波数依存モデルの妥当性と高周波数側への拡張性、ならびにPS検層によって減衰定数の下限値を推定できる可能性を示している。



異なる手法による減衰定数の評価結果の比較

【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

【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

- 既許可時審査以降、継続的に敷地地盤において地震観測を実施。敷地で得られた地震観測記録は90地震から149地震に増加している（119頁）。今回、既許可時審査以降取得した地震観測記録を含めて、以下の①、②についてデータの更新を実施。

- ①地震の到来方向による増幅特性
- ②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比

- ①・②のデータを更新した結果は以下のとおり。

①地震の到来方向による増幅特性（120頁～123頁）

- ・ 既許可時審査と同様に、地震の到来方向による特異な地盤増幅の傾向は見られない。
- ・ ただし、東方向は2016年熊本地震により数が増加し、既許可時審査に比べて短周期側の比率が小さくなり、長周期側の比率が大きくなる傾向があり、内陸地殻内地震以外も長周期側が大きくなる傾向があるが、いずれも地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示している。

②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比率（124頁～126頁）

- ・ 既許可時審査と同様に、全周期帯で概ね1を下回る傾向。
- ・ ただし、①の検討において、伝播距離が遠い場合、短周期側の比率が小さく、長周期側の比率が大きくなる傾向があるため、伝播距離の違いが短周期側及び長周期側の比率に与える影響について、検討した結果、伝播距離が近い地震は短周期側の比率が大きくなる傾向にあるが、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示しており、概ね1を下回る傾向は変わらないことを確認。

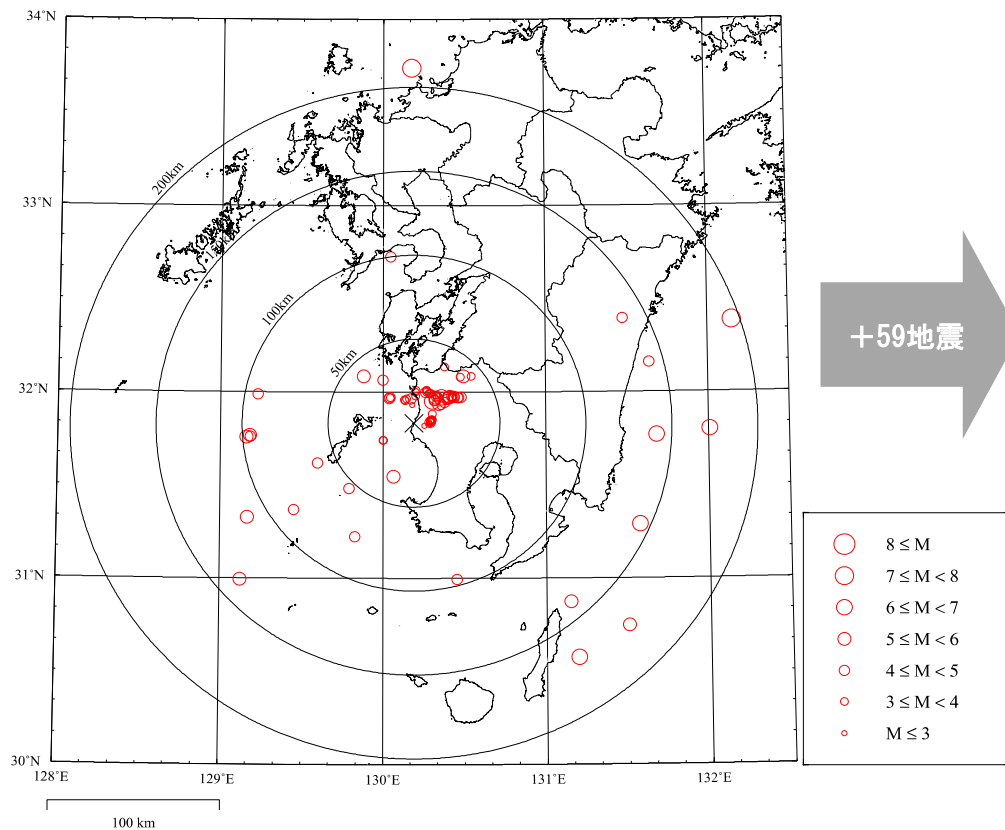
- 以上、①・②を踏まえ、①地震の到来方向による特異な地盤増幅の傾向はなく、②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比率が概ね1を下回る傾向は変わらず、観測記録の補正係数を用いない既許可の判断が変わるものではないことを確認。

※なお、既許可以降に得られた地震観測記録は地下構造モデルの設定に用いていないこと、及び震央距離がやや遠い記録が増加し伝播距離による減衰の影響を受けていることを踏まえ、既許可時審査時以降に取得した地震観測記録は①・②において参照しない。

【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

- 既許可時審査から敷地で得られた地震観測記録は90地震から149地震に増加。
- 既許可時審査以降に増加した地震観測記録を含め、①地震の到来方向による増幅特性の検討及び②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比についてデータを更新。

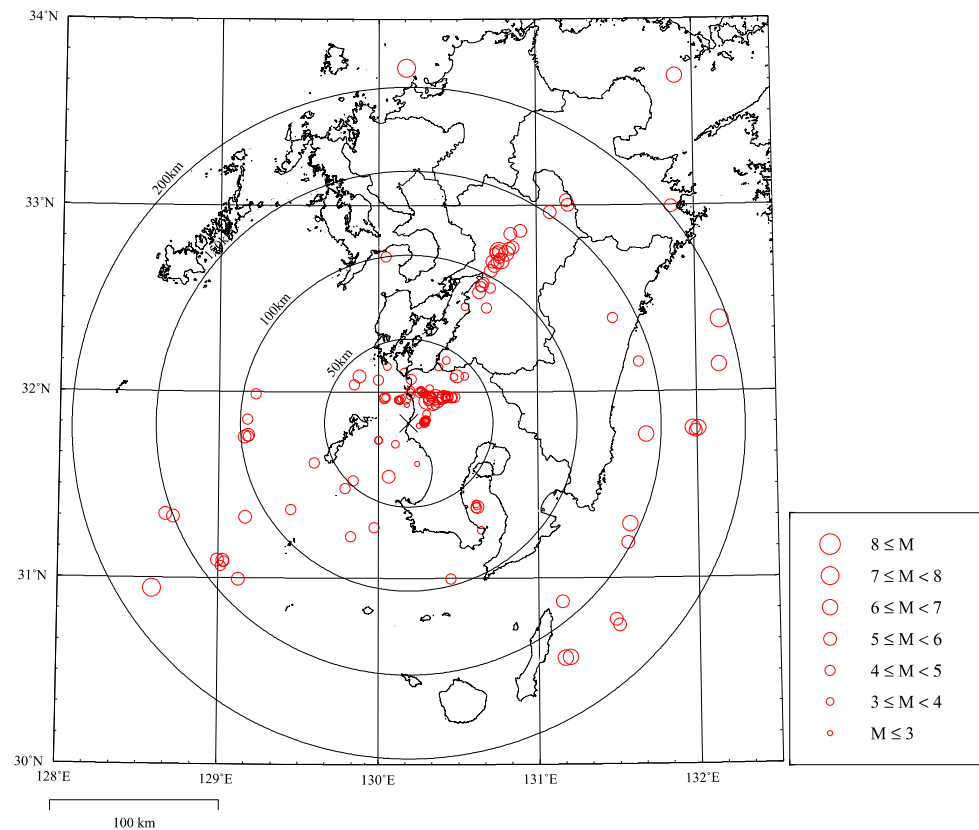
計90地震



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)

計149地震

※2015年小笠原諸島西方沖地震は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

【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

①地震の到来方向による増幅特性について

- 既許可時審査と同様に、敷地で得られた地震観測記録のうちM5.0以上の内陸地殻内地震及び内陸地殻内地震以外の地震を対象に、地震の到来方向による増幅特性について検討を実施。
- 敷地で得られたM5.0以上の地震観測記録は既許可時審査から29地震増加。(下表参照:ハッチ部は既許可評価時の地震)

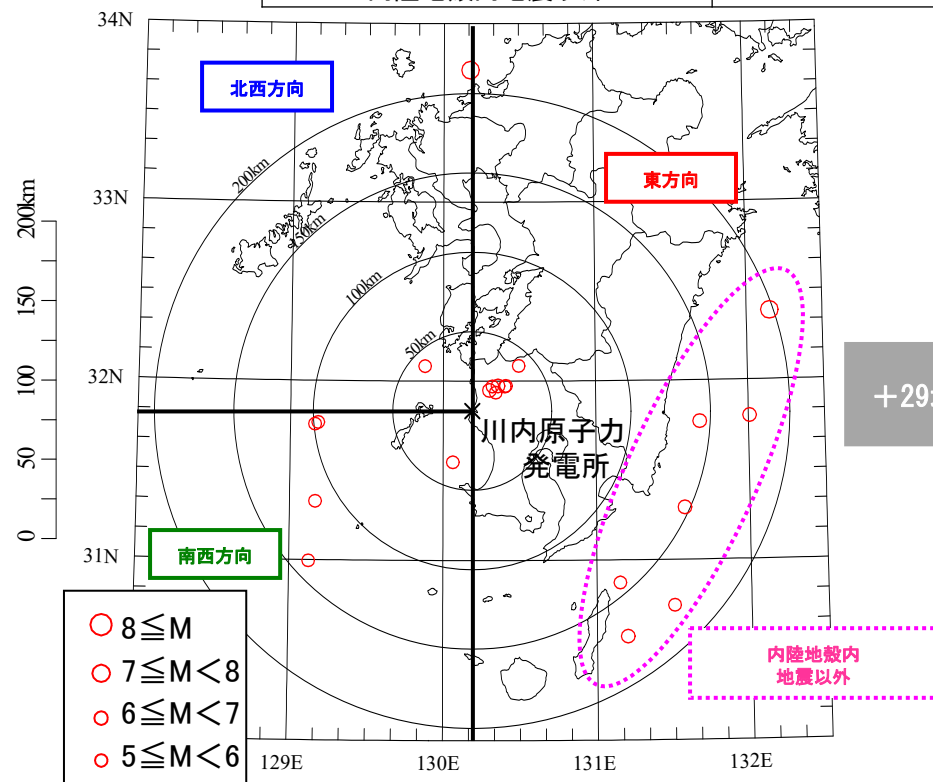
到来方向	地震名	発生日	M	震央距離(km)	深さ(km)
南西方向	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34	13.0
	九州南西沖	1992年11月29日	5.0	137	5.0
	九州南西沖	1994年10月5日	5.2	112	6.7
	九州南西沖	2004年12月12日	5.1	96	14.7
	九州南西沖	2004年12月14日	5.3	98	18.8
	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181	17.0
	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151	9.4
	薩摩半島西方沖	2015年11月18日	5.0	154	7.6
	薩摩半島西方沖	2016年5月6日	5.0	138	10.6
	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140	6.5
北西方向	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	211	9.2
	天草灘	2006年2月4日	5.1	40	11.6
内陸地殻内地震以外	九州南東沖	1984年8月7日	7.1	195	33.0
	大隅半島南東沖	1993年8月2日	5.6	174	42.0
	大隅半島南東沖	1994年4月30日	6.0	145	48.0
	種子島付近	1996年10月18日	6.4	169	37.7
	日向灘	1996年10月19日	6.9	172	34.0
	日向灘	1996年12月3日	6.7	141	38.0
	大隅半島東方沖	2010年1月25日	5.4	140	48.7
	日向灘	2014年8月29日	6.0	188	18.2
	大隅半島東方沖	2017年4月29日	5.6	170	43.8
	大隅半島東方沖	2018年6月12日	5.6	148	28.1
	種子島近海	2019年1月8日	6.0	168	30.1
	日向灘	2019年5月10日	5.6	171	25.4
	日向灘	2019年5月10日	6.3	169	25.5

到来方向	地震名	発生日	M	震央距離(km)	深さ(km)
東方向	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40	5.2
	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22	11.9
	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20	14.8
	鹿児島県北西部	1997年4月5日	5.2	25	12.0
	鹿児島県北西部	1997年4月9日	5.1	26	10.5
	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17	9.2
	鹿児島県北西部	1997年5月14日	5.1	19	8.9
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116	11.4
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122	8.3
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.0	107	11.1
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.1	120	14.2
	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111	6.7
	熊本県熊本地方	2016年4月15日	5.0	109	10.5
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116	12.5
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.3	103	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115	15.2
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132	10.6
	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151	6.9
	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162	10.9
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	128	15.9
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	12.3
	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	8.6
	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88	10.0
	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.0	93	10.8
	鹿児島湾	2017年7月11日	5.3	64	10.2

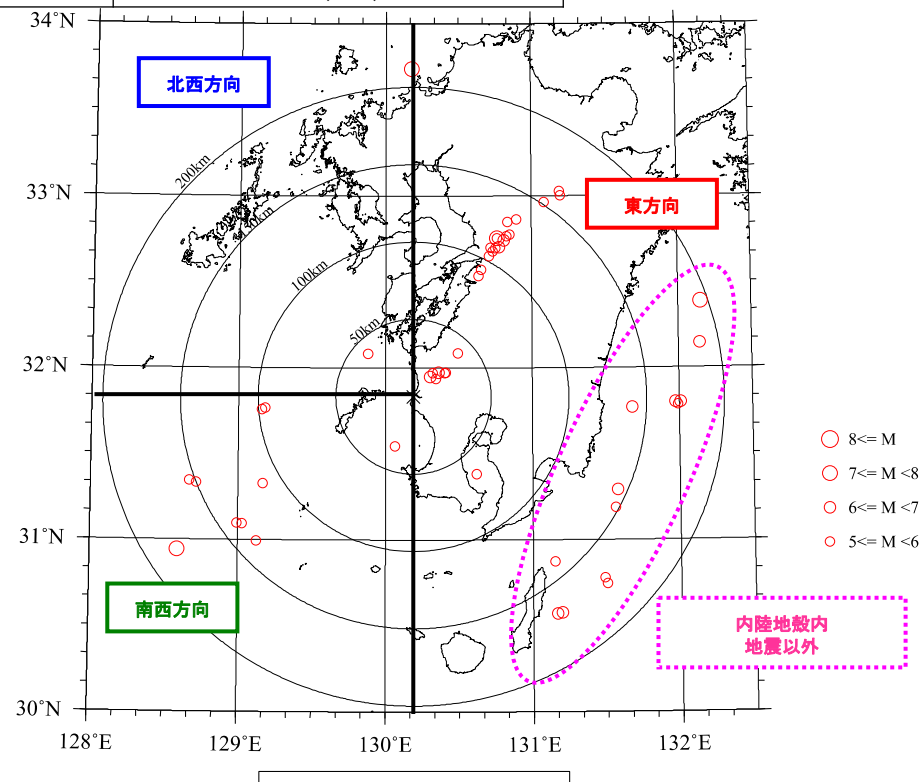
【参考⑤】既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査以降、計29の地震観測記録が増加している。地震観測記録の内訳は以下の通り
 - 北西方向の地震観測記録は増加していない。
 - 東方向の地震観測記録は18地震増加している。（2016年熊本地震前震・本震・余震、鹿児島湾の地震）
 - 南西方向の地震観測記録は5地震増加している。（2015年薩摩半島西方沖の地震）
 - 内陸地殻内地震以外の地震観測記録は6地震増加している。

方向	既許可時審査	既許可時審査以降
北西方向	2	2 (0)
東方向	7	25 (+18)
南西方向	5	10 (+5)
内陸地殻内地震以外	7	13 (+6)



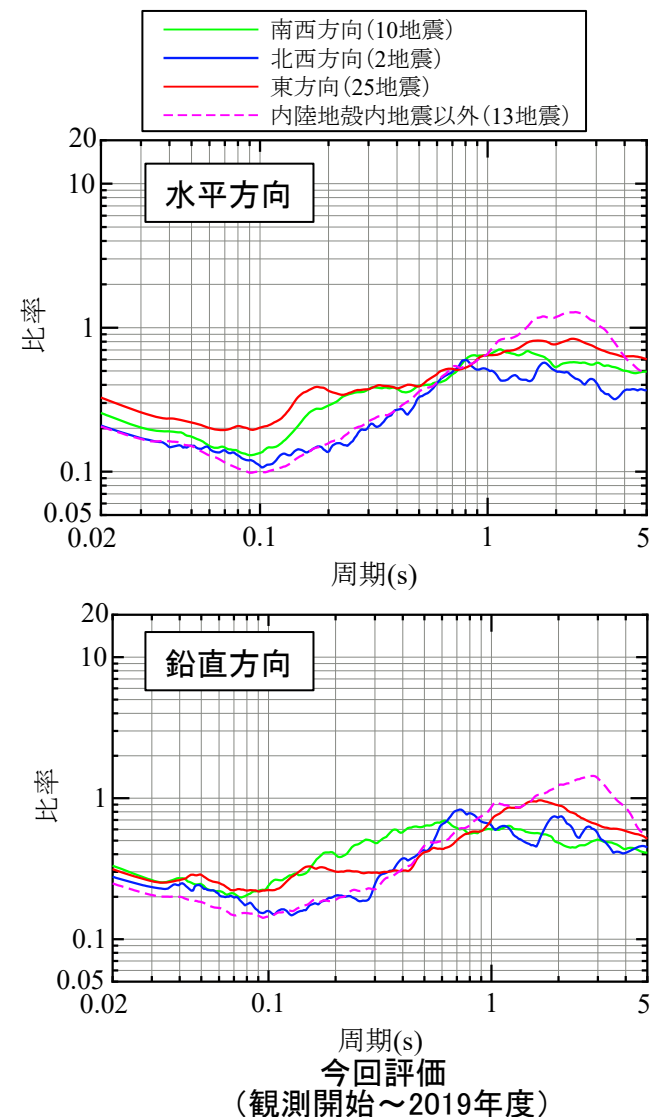
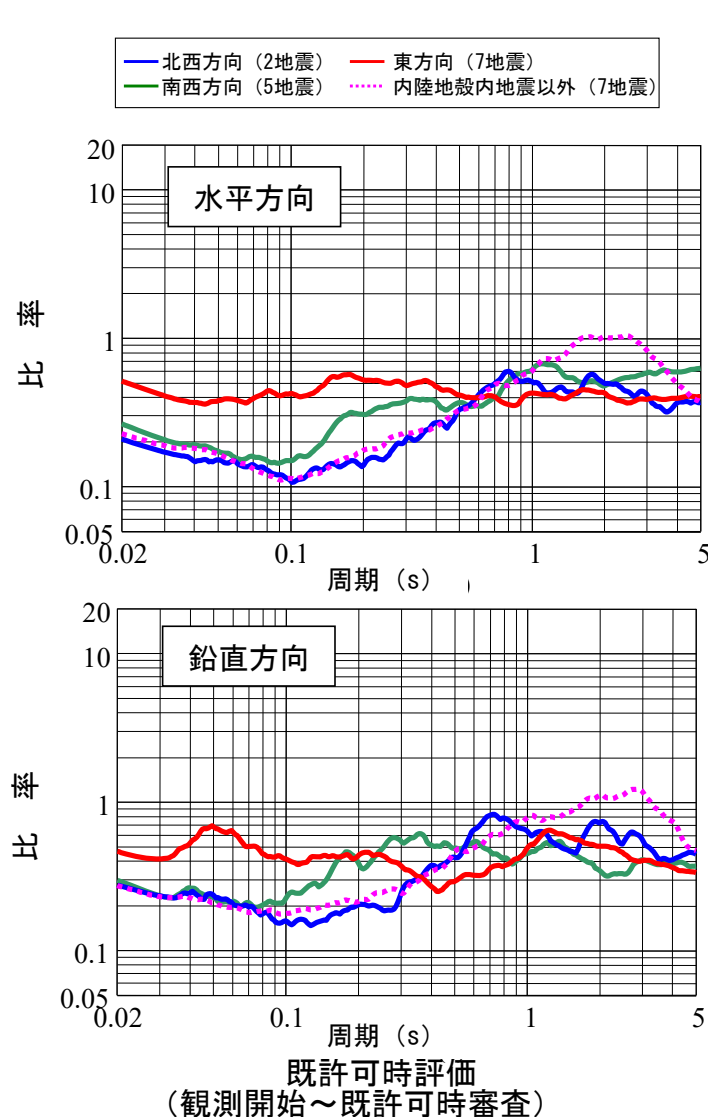
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

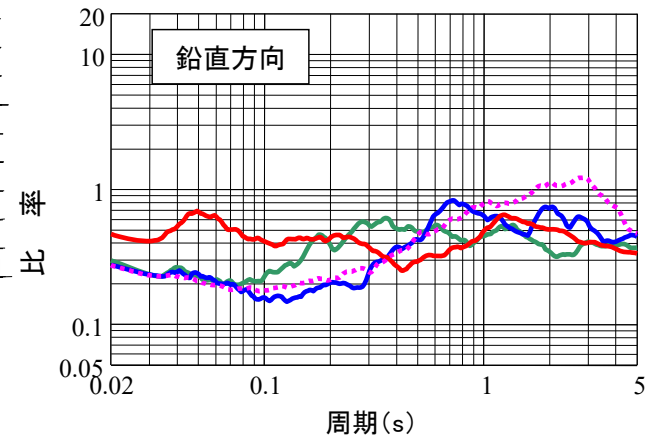
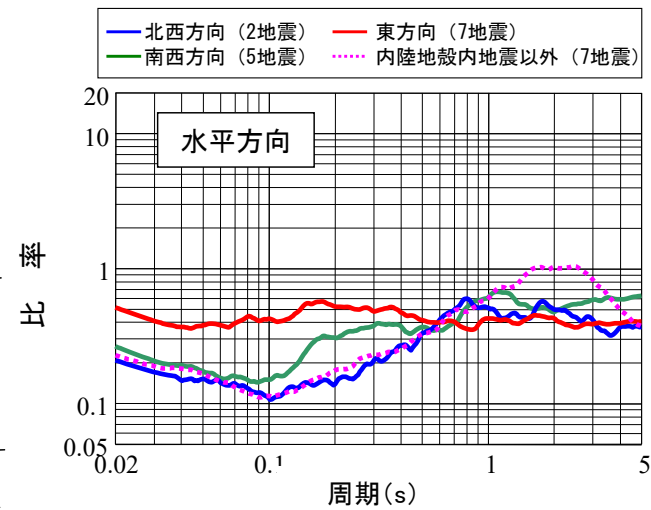
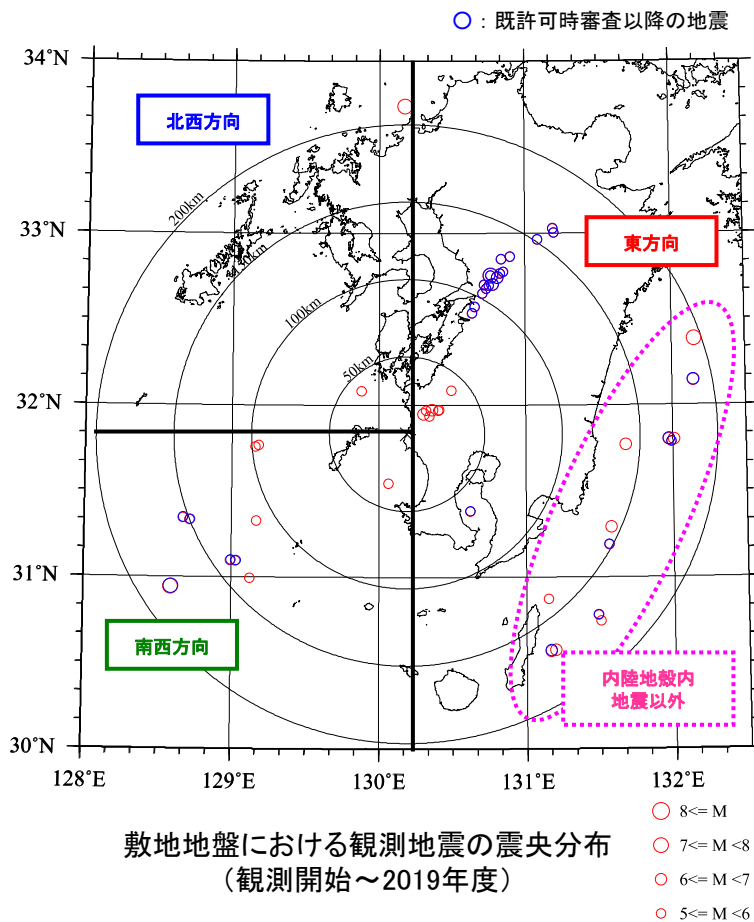
【参考⑤】既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査以降に取得した29地震を加えたM5.0以上の地震により敷地地盤で得られた地震観測記録 (EL. 11m) とNoda et al. (2002) による応答スペクトルとの比を到来方向別に比較・検討した結果、既許可時審査と同様に、各方向のばらつきはあるが、概ね1を下回っており、特異な地盤増幅がないことを確認した。
- ただし、東方向は2016年熊本地震により数が増加し、既許可時審査に比べて短周期の比率が小さくなり、長周期の比率が大きくなる傾向があり、また、内陸地殻内地震以外について長周期の比率がやや大きくなる傾向があることから次頁で要因を分析。

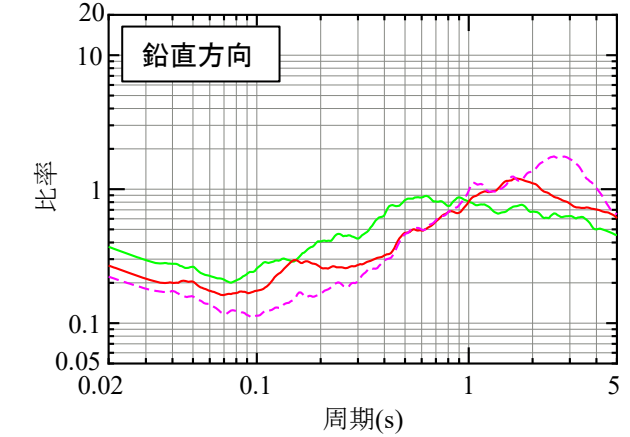
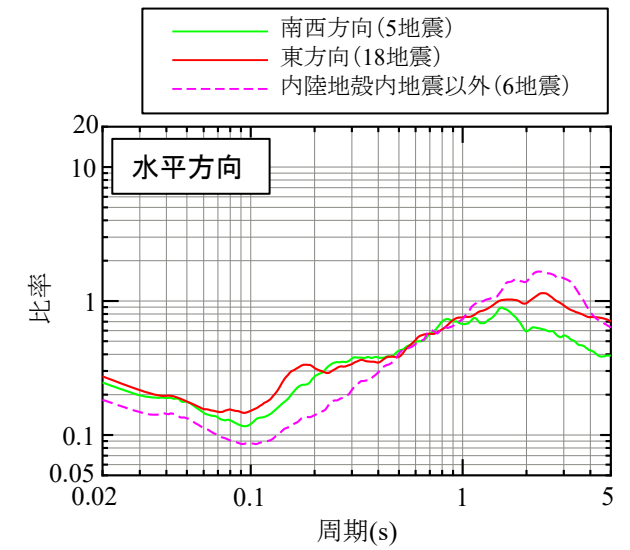


【参考⑤】既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- ここでは、短周期側の比率が小さくなり、長周期の比率が大きくなる傾向が見られた東方向に着目して、既許可時審査時と既許可時審査から2019年度までの比率を算出。
- 既許可時審査の東方向では1997年鹿児島県北西部地震の地震群（震央距離50km以内）が主であり、伝播距離の減衰効果による影響が小さかった。一方、既許可時審査以降の東方向は2016年熊本地震の地震群（震央距離100km以上）が主であり、伝播距離の減衰効果による影響により短周期側が小さくなったと考えられる。また、長周期側が大きくなった要因としては、表面波の影響や伝播距離が遠くとも長周期成分は減衰効果が小さいためと考えられる。
- また、内陸地殻内地震以外は160km～190km程度の震央距離が比較的遠い記録が増加していることから、伝播距離の減衰効果による影響を受けにくい長周期側が大きくなったと考えられる。
- いずれも、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示している。



既許可時評価
観測開始～既許可時審査



今回評価
既許可時審査～2019年度

【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

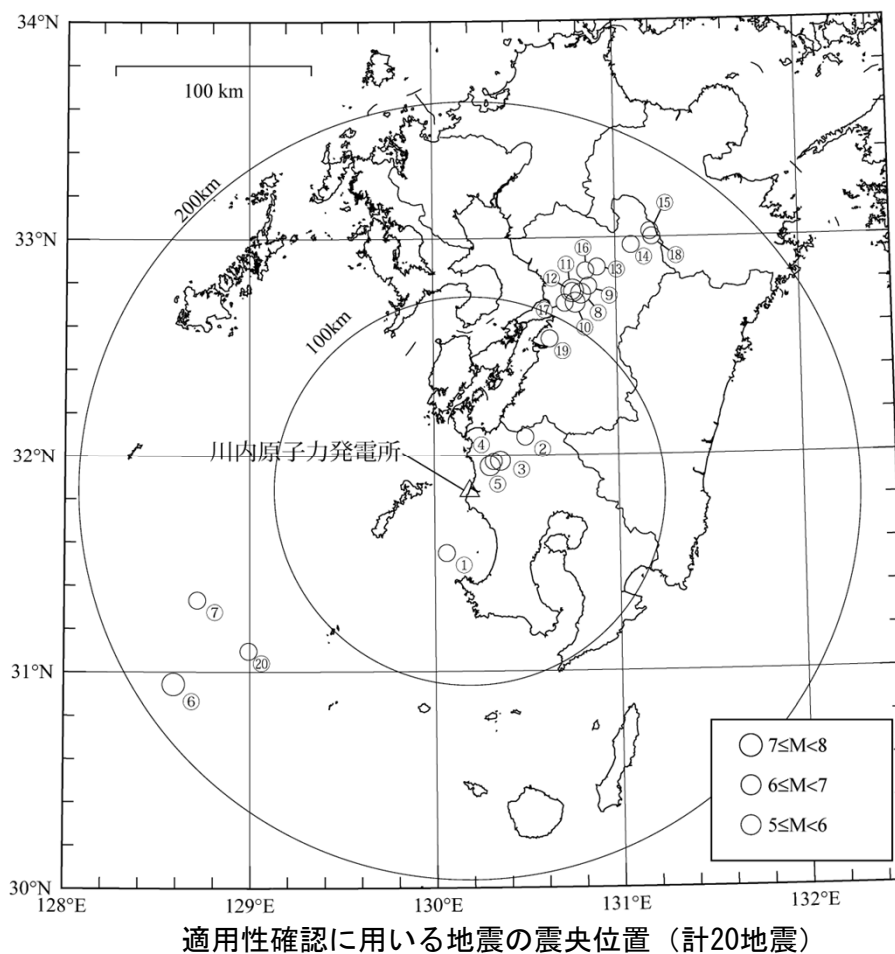
②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比較

- 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*の地震観測記録とNoda et al. (2002) による応答スペクトルとの比を算定。

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

地震諸元 (計20地震)

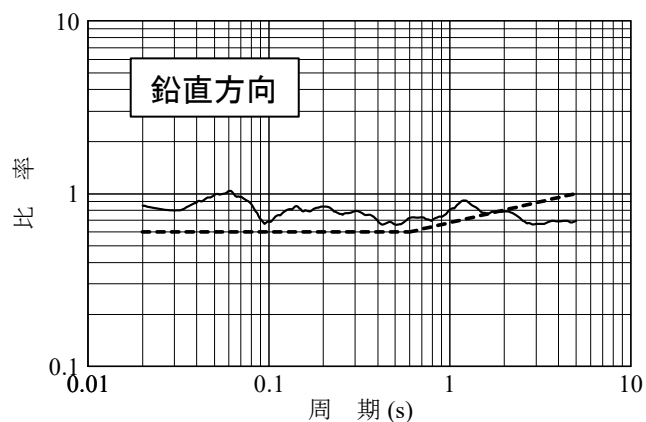
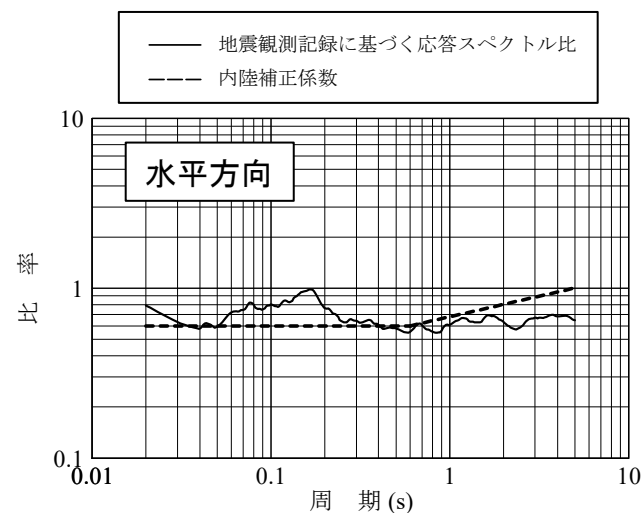
番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34	24
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40	25
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22	23
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20	21
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17	23
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181	25
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151	25
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116	25
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14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	128	25
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑲	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



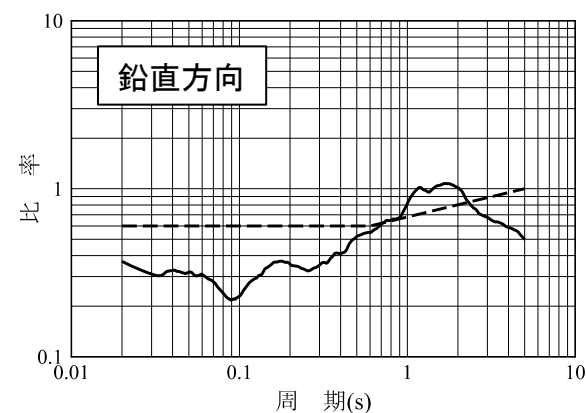
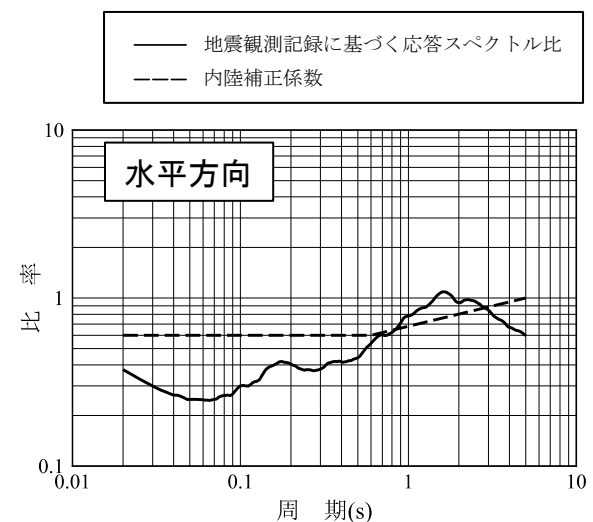
既許可時審査
↑
今回新たに追加

【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

- 既許可時審査までと2019年度までに敷地地盤で得られた内陸地殻内地震の地震観測記録（M5.4以上の地震、震央距離200km程度以内）とNoda et al. (2002)による応答スペクトルとの比を比較・検討した結果、既許可時審査と同様に、全周期帯で概ね1を下回る傾向であることを確認した。
- 一方、観測開始から2019年度では、短周期が小さくなり、長周期が大きくなる傾向があることから、次頁で分析を行う。



既許可時評価
観測開始～既許可時審査(①～⑤)



今回評価
観測開始～2019年度(①～⑳)

【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

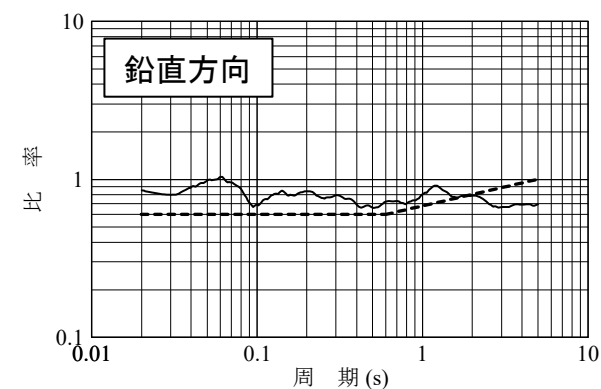
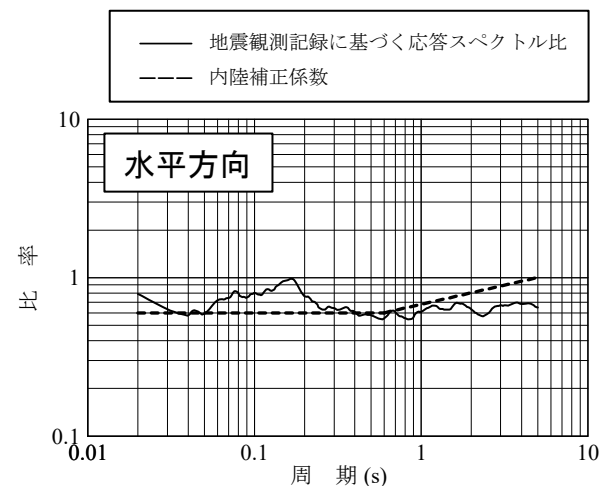
■ 短周期側が小さく、長周期側が大きい傾向となる要因分析

- 既許可時審査の地震観測記録と既許可時審査以降の地震観測記録についてそれぞれ比率を計算すると、既許可時審査以降の地震観測記録は、既許可時審査の地震観測記録に比べ、短周期側の比率が小さく、長周期側の比率が大きくなっている。
- これは、既許可時審査の地震観測記録は1997年鹿児島県北西部地震の地震群（震央距離50km以内）が主であるのに対し、既許可時審査以降の東方向は2016年熊本地震の地震群（震央距離100km以上）が主であることから、伝播距離の減衰効果による影響により短周期側が小さくなったと考えられる。また、長周期側が大きくなった要因として、表面波の影響や伝播距離が遠くとも長周期成分は減衰効果が小さいためと考えられる。
- いずれも、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示している。

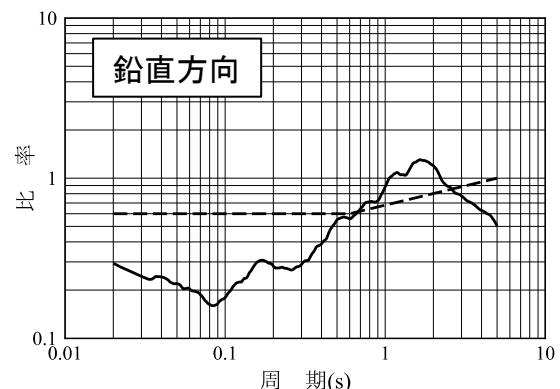
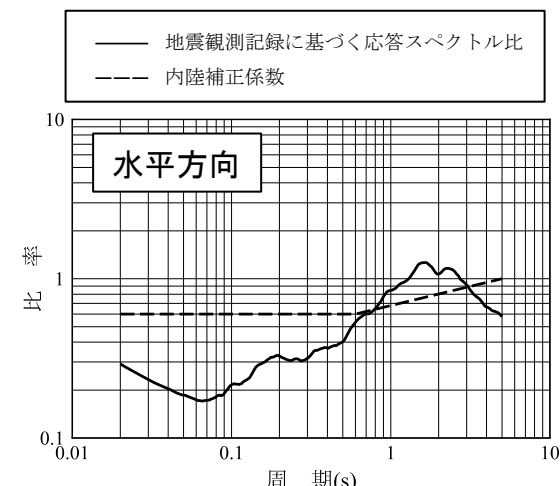
地震諸元（計20地震）

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	128	25
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑲	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



既許可時評価
観測開始～既許可時審査(①～⑤)



今回評価
既許可時審査～2019年度(⑥～⑳)

【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

【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

- 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動評価の記載について、不確かさ及び保守性に関する記載の充実。
- 既許可時のまとめ資料のうち、各記載の該当箇所を整理。

今回

7.5.6.2 震源を特定せず策定する地震動

(2) 検討対象地震の選定と震源近傍の観測記録の収集

b. 「全国共通に考慮すべき地震動」(Mw6.5程度未満の地震)

(a) 2004年北海道留萌支庁南部地震

(中略)

□2004年北海道留萌支庁南部地震では、震源近傍のK-NET港町観測点において□佐藤ほか(2013)⁽³¹⁾により、ボーリング調査等による精度の高い地盤情報が得られて□おり、信頼性の高い基盤地震動が推定されている。これらを参考に地盤モデルの不確かさを踏まえて基盤地震動を算定する。敷地の解放基盤表面のS波速度は、K-NET港町観測点のS波速度0.938km/sを上回る1.5km/sであることから、敷地の解放基盤波は保守的にK-NET港町観測点の基盤地震動を採用する。この解放基盤波にさらに保守性を考慮した上で□地震動を設定する。

(以下略)

①2004年北海道留萌支庁南部地震に関する地盤モデルの不確かさに関する記載(130頁、131頁)

②敷地の解放基盤波を保守的に設定するため、K-NET港町観測点のS波速度の0.938km/sを上回る1.5km/sの敷地の解放基盤解放基盤波として、K-NET港町観測点の基盤地震動を採用する旨を記載。(129頁)

③K-NET港町観測点の基盤地震動を採用した解放基盤波に、当社の読み取りである不確かさを考慮してさらに余裕(10ガル程度)を持たせた地震動を2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動として考慮した旨の記載(130頁、132頁)

【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

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

第114回審査会合 資料2-3
川内原子力発電所 地震について
に赤枠を追記

2004年北海道留萌支庁南部地震の「震源を特定せず策定する地震動」への反映

[検討全体の流れ](電力大での検討)

佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見

- ・ ボーリング、PS検層により、深さ-41mまでの地盤モデルを構築
- ・ 室内試験により、非線形性に係るデータも取得
- ・ それらのデータにより、解放基盤波 ($V_s=938$ m/s)を推計 **【P153】**

解放基盤波の妥当性に係るこれまでの整理

- ・ はぎとり手法 (SHAKE)における不確かさの検討(有効ひずみの補正係数 α のケーススタディ)
 - ・ その他のはぎとり手法による検討
 - ・ 観測事実(H/Vスペクトル)再現の試み
- ⇒ 現状の解放基盤波の妥当性(観測事実をよく説明できること)を確認

今後の取り組み

- ・ 深さ-6m以深で追加取得したデータ(非線形特性等)を踏まえた妥当性の確認
- ・ 深さ-500mまでのボーリングデータを踏まえた、より深い(硬い:当社解放基盤相当)位置での解放基盤波の確認

現時点における当社としての判断

(当社独自の判断)

- ・ 佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見[現位置で直接確認したデータに基づいていること]、これまでの整理[手法の不確かさについての確認]から、現状の解放基盤波の信頼性は高いと考えられる
- ・ **また、当社解放基盤(川内: $V_s=1500$ m/s、玄海: $V_s=1350$ m/s)よりも軟らかい位置での地震動であり、現状の解放基盤波は保守性を有している**
- ・ これらの妥当性・保守性については、今後の取り組みによって更に明らかになっていくもの
- ・ しかしながら、それまでには**ある程度の時間が必要**
- ・ よって、それが明らかとなっていく途上である現時点においては、**一定の余裕を持たせた地震動**を「震源を特定せず策定する地震動」として新たに設定し、それによって施設の安全性を確認していくこととする

〈新たな地震動の設定の考え方〉

- ・ 一定の余裕を持たせた地震動を設定することを目標とし、パラメータスタディを実施

【P154~P162】

- ・ その結果を踏まえ、「震源を特定せず策定する地震動」として設定

【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

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

第114回審査会合 資料2-3
川内原子力発電所 地震について
に赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

- 2004年北海道留萌支庁南部地震の現状の解放基盤波については、現時点においては、更なるデータによってその妥当性・保守性が明らかになっていく途上であることに鑑み、当社独自に一定の余裕（保守性）を持たせた地震動を設定することを目標として、以下の流れで整理・検討を実施した。

【余裕を持たせた地震動を設定するための対象となるパラメータの選定】

- ・ 佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見においては、深さ-6mまでの非線形特性に係るデータを取得し、深さ-41mにおける解放基盤波を推計している。
- ・ 現在、深さ-6m以深の非線形特性について、追加取得したデータを基に更なる検討が進められているところ。
- ・ 深さ-6m以深の非線形特性を考慮する場合、傾向としては、減衰の増大によるはぎとり結果（地震動レベル）の増大、剛性の低下によるはぎとり結果（地震動レベル）の低下が見られることが想定される。

この2つの傾向が深さ-41mでのはぎとり結果にどのような影響を与えるかは今後の更なる検討を待たねばならないが、現状の解放基盤波が観測事実(H/Vスペクトル等)をよく説明できていることを踏まえると、大きな変動をもたらすものとはならないと考えられる。

- ・ ここでは、上記の2点の傾向を踏まえ、はぎとり結果（地震動レベル）が大きくなるパラメータ：減衰のみを対象として、そのパラメータスタディを実施し、余裕を持たせた地震動を設定することとした。
- ・ なお、現在-41m以深（-500mまで）のボーリングデータを踏まえた更なる検討も進められているが、現状よりも硬い岩盤上での解放基盤波の推計であり、地震動レベルはより小さくなる方向であることから、ここでは考慮しないこととした。

佐藤ほか(2013)⁷⁾における地震動評価モデル

上面深度 (m)	P波速度 Vp(m/s)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10 ³ kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0		200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5	457	200	2.00	0.5	0.03	塊凝り砂
1		200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5	952	290	2.00	1.0	0.01	礫2
2		290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
3		370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
4		400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5	1722	473	2.00	1.0	0.01	—
6		549	2.00	9.0	0.01	—
7		604	2.06	7.0	0.01	—
16		653	2.06	18.0	0.01	—
23	2215	938	2.13	—	0.01	—
38		—	—	—	—	—
41	—	—	—	—	—	—

【余裕を持たせた地震動の設定】

- ・ 深さ-6m～-41m範囲の減衰定数について、既往の知見を踏まえたパラメータスタディを実施。
- ・ その結果を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定。

①
③

【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

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

第114回審査会合 資料2-3
川内原子力発電所 地震について
に赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

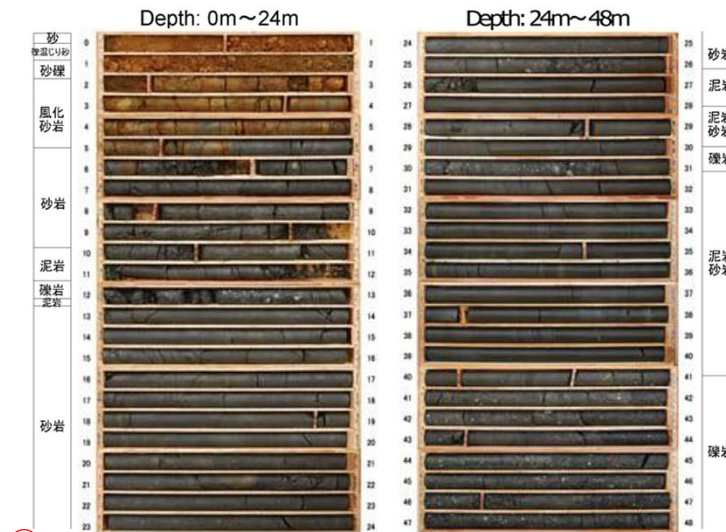
■ 前頁での知見の整理を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定するための減衰の値を以下のとおり判断。

・ 前々頁の知見では、岩盤の亀裂やランダム性等の不均質性の影響により、室内試験の結果よりも減衰が大きくなる場合があるとの指摘。

・ 佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見では、留萌のボーリングコア写真からは深さ-6m以深は比較的均質な性状であることが見て取られ、深さ-6mまでの室内試験結果による非線形特性からも減衰の値は1%程度以下であることが見て取れる。すなわち、ある程度の不均質性を考えたとしても、岩盤としての減衰はそれほど大きなものではないと推察される。

・ しかしながら、深さ-6m以深の減衰については、現在、定量的なデータの評価が進められている途上にあり、現時点で確定的に判断することは難しい。

・ よって、前頁で整理した減衰の実例を参考として、3%まで減衰を大きくしたパラメータスタディを実施し、その結果を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定することと判断。



① 佐藤ほか(2013)⁷⁾におけるボーリングコア写真（左：深さ0m~24m、右：深さ24m~48m）

佐藤ほか(2013)⁷⁾における地震動評価モデル

上面深度 (m)	P波速度 Vp(m/s)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10 ³ kg/m ³)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	457	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5		200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1		200	2.00	1.0	0.02	礫1
1.5	952	290	2.00	1.0	0.01	礫2
2						風化砂岩1
3		290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
4		370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5		400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
6	1722	473	2.00	1.0	0.01	—
7		549	2.00	9.0	0.01	—
16		604	2.06	7.0	0.01	—
23		—	—	—	—	—
38	2215	653	2.06	18.0	0.01	—
41		938	2.13	—	0.01	—

【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

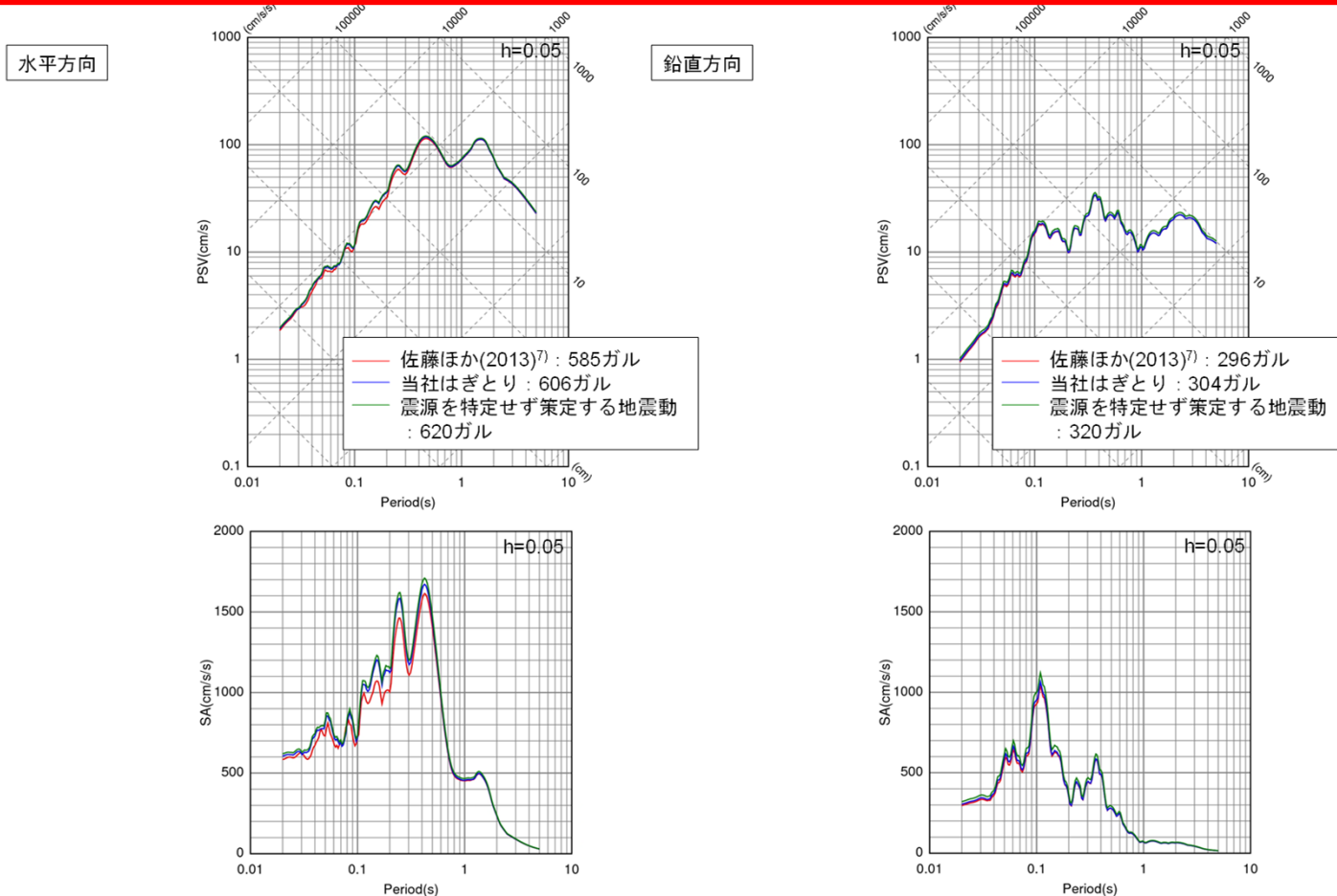
■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

第114回審査会合 資料2-3
川内原子力発電所 地震について
に赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

■ 前頁までの検討に対し、当社独自の'読み取り'による解析であることの不確かさを踏まえ、さらに余裕(10ガル程度)を持たせた下記の地震動を震源を特定せず策定する地震動として考慮する。

③



162

【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

【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

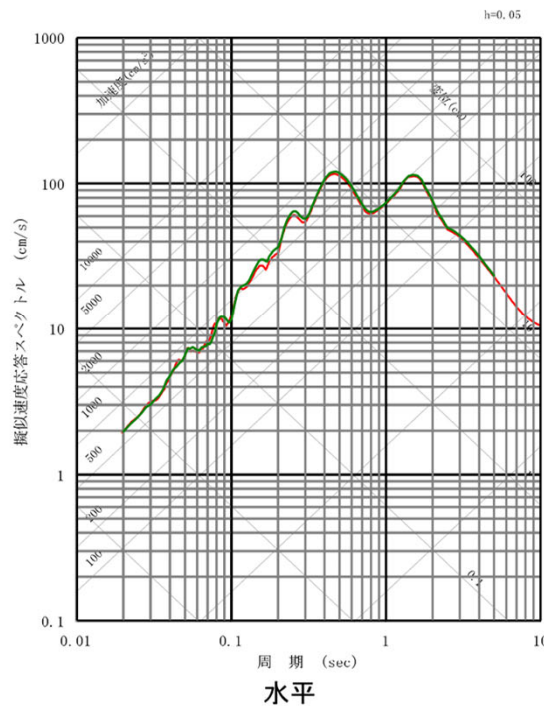
- 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動（以下、「留萌地震動」とする。）の策定にあたり、当社川内及び玄海では、佐藤ほか(2013)の図の“読み取り”により地盤モデルを設定している。
- 他社原子力発電所（硬岩サイト）では、水平動については、佐藤ほか(2013)による数値データに基づき、上下動については、佐藤ほか(2013)以降に再測定したPS検層に基づき、地盤モデルを設定している。
- 上記の通り、設定した地盤モデルはそれぞれ異なるが、当社川内及び玄海と他社原子力発電所の留萌地震動について比較した結果、地震動レベルは概ね同等であることを確認済みである。

5. 震源を特定せず策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

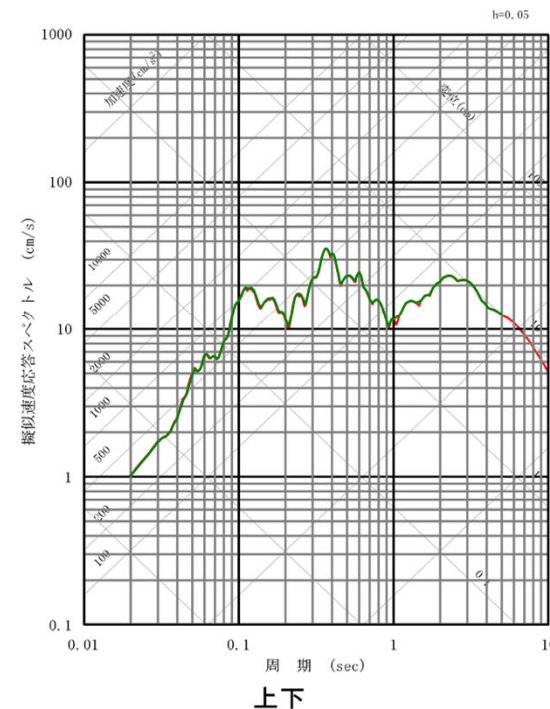
101

■ 2004年北海道留萌支庁南部地震の評価結果



【当社】

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動



【他社原子力発電所（硬岩サイト）】

— 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

第131回審査会合
資料1-3 高浜発電所
地震動評価について
に加筆

【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

【参考】 川内原子力発電所及び玄海原子力発電所と他社の留萌地震動の策定の比較

- ・ 当社川内及び玄海と他社原子力発電所の留萌地震動の策定に関する違いは以下のとおり。

当社川内及び玄海と他社原子力発電所（硬岩サイト）の留萌地震動の策定の違い

	当社（川内・玄海）	他社（硬岩サイト）
水平動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)の非線形特性のうち礫混じり砂の非線形特性について、<u>佐藤ほか(2013)の図の“読み取り”</u>による値を設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（136頁）し、等価線形化法によりはぎとり波（<u>606ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に余裕を考慮して、620ガルの基準地震動を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)の非線形特性のうち礫混じり砂の非線形特性について、<u>佐藤ほか(2013)による数値データに基づき</u>設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（138頁）し、等価線形化法によりはぎとり波（<u>609ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、620ガルの基準地震動を策定
上下動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)のP波速度、地盤減衰について、佐藤ほか(2013)の図の<u>“読み取り”</u>による値を設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（137頁）し、線形解析によりはぎとり波（<u>304ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に余裕を持たせて、320ガルの基準地震動を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)以降に、<u>再測定を実施したPS検層に基づき地盤モデルを再設定</u>（138頁）し、線形解析によりはぎとり波（<u>306ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、320ガルの基準地震動を策定

【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

【参考】 当社の留萌地震動に用いた地盤モデル（水平動）

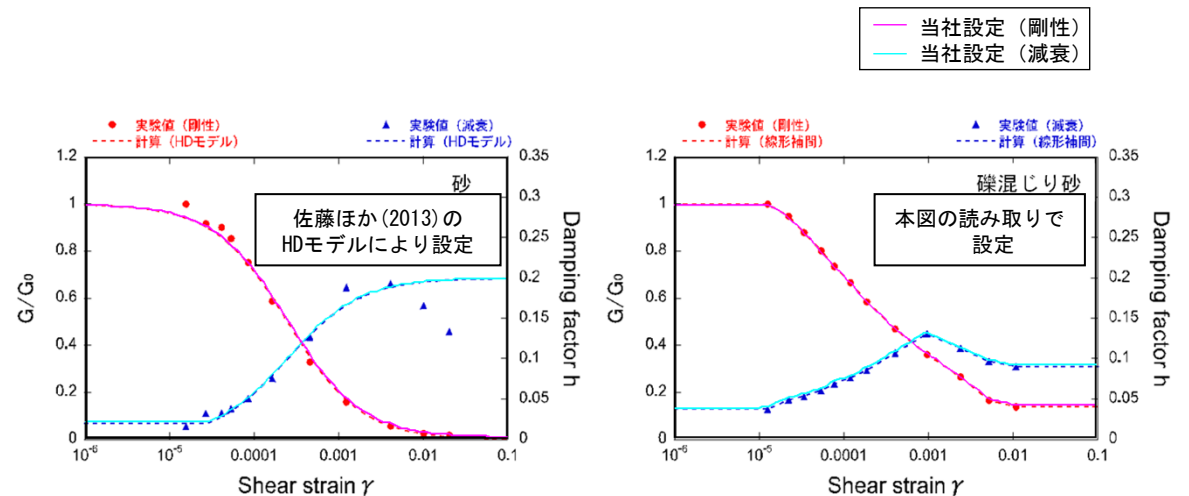
- ・ 礫混じり砂の非線形特性については、佐藤ほか（2013）の図の読み取りで設定（礫混じり砂以外はHD（Hardin-Drnevich）モデルにより設定）
- ・ EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定

当社独自に設定した初期モデル

上面深度 (m)	S波速度 Vs(m/s)	密度 ρ (10^3kg/m^3)	層厚 H(m)	減衰定数 h	非線形特性
0	200	1.90	0.5	0.02	砂
0.5	200	2.00	0.5	0.03	礫混じり砂
1	200	2.00	1.0	0.02	礫1
2	290	2.00	1.0	0.01	礫2
3	290	2.00	1.0	0.01	風化砂岩1
4	370	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
5	400	2.00	1.0	0.01	風化砂岩2
6	473	2.00	1.0	0.03	—
7	549	2.00	9.0	0.03	—
16	604	2.06	7.0	0.03	—
23	653	2.06	18.0	0.03	—
41	938	2.13	—	0.03	—

 読み取りにより地盤の非線形特性を設定

 減衰定数1%⇒3%に設定

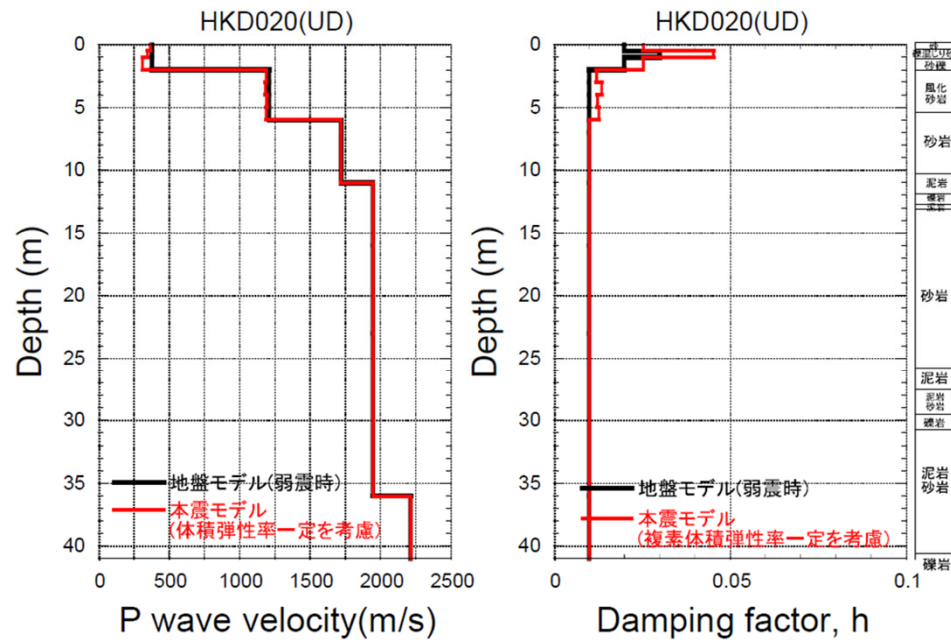


【参考⑦】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考】 当社の留萌地震動に用いた地盤モデル（上下動）

- ・ 佐藤ほか（2013）の「（付録）上下成分の基盤地震動の推定」の付図1から、P波速度 V_p 及び減衰定数 h を読み取り、地盤モデルを設定
- ・ EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定

佐藤ほか（2013）によるP波速度と減衰定数



当社独自に設定した地盤モデル（上下動）

上面深度 (m)	P波速度 V_p (m/s)	密度 ρ (10^3kg/m^3)	層厚 H (m)	減衰定数 h
0	360	1.90	0.5	0.0253
0.5	345	2.00	0.5	0.0452
1	312	2.00	0.5	0.0253
1.5	312	2.00	0.5	0.0253
2	1185	2.00	1.0	0.0120
3	1180	2.00	1.0	0.0134
4	1190	2.00	1.0	0.0123
5	1185	2.00	1.0	0.0127
6	1722	2.00	1.0	0.03
7	1722	2.00	4.0	0.03
11	1947	2.00	5.0	0.03
16	1947	2.06	7.0	0.03
23	1947	2.06	13.0	0.03
36	2215	2.06	2.0	0.03
38	2215	2.06	3.0	0.03
41	2215	2.13	—	0.03

付図 1 2004 年留萌地震時の P 波速度と減衰定数

- ・ 佐藤ほか（2013）は、水平方向の初期地盤モデルを用いて求めた複素体積弾性率と2004年留萌地震時のEW成分の収束物性値から V_p と h_p を算出
- ・ 水平方向の地盤モデルにより密度 ρ は既知のため、P波速度 V_p 、減衰定数 h を佐藤ほか（2013）付図1から読み取り（図中：赤線）

読み取りによりP波速度 V_p 、減衰定数 h を設定

減衰定数1%⇒3%に設定

【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

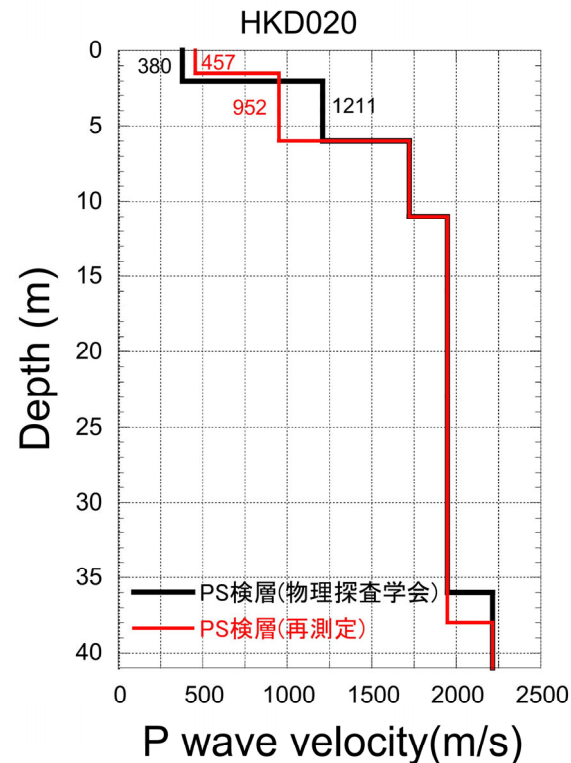
【参考】 他社原子力発電所（硬岩サイト）の留萌地震動に用いた地盤モデル

- ・ 水平動の地盤モデルの礫混じり砂の非線形特性については、佐藤ほか（2013）による数値データに基づき、EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定
- ・ 上下動の地盤モデルは、佐藤ほか（2013）以降に再測定を実施したPS検層に基づき、再設定

表層の地盤モデル見直しに伴う上下動の再評価

23

■表層部に重点をおいたPS検層の再測定の結果、港町観測点のP波速度モデルが以下のとおり変更されている。



第101回審査会合
資料1-1 高浜発電所・大飯発電所 震源を特定せず策定する地震動について
コメント回答（2004年留萌支庁南部の地震） 抜粋

参考文献

- 1) 宮腰研・PETUHKHIN A・香川敬生(2004)：地殻内地震のやや短周期まで精度のある震源モデルの推定—1997年3月鹿児島県北西部地震と1997年山口県北部地震—、日本地震学会2004年秋季大会予稿集、P065
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2003)：布田川・日奈久断層帯の地震を想定した強震動評価について
- 3) 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, pp. 399-408.
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) H. Kanamori(1977)：The Energy Release in Great Earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.82, No.20, 2981-2987.
- 7) 地盤工学会(2013)：地盤の弾性波速度検層方法, JGS1122-2013, 2013年3月
- 8) 信岡大, 東宏幸, 大場政章(2012)：PS検層の手法を用いた地盤減衰特性(Q値)の評価, 物理探査, 第6巻, 第1&2号, 79-90, 2012年
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 石田寛, 太田外気晴, 原昭夫, 高橋克也(1987)：室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰評価, 第15回地盤震動シンポジウム, 1987年8月
- 12) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明(2010)：PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される地盤の減衰定数の関係性, 物理探査学会第122回学術講演会論文集(2010), 37-40, 2010年
- 13) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明, 安藤誠, 鈴木晴彦, 松山尚典(2013)：PS検層による地盤のS波の減衰定数の評価に関する検討—鉛直アレー観測による減衰定数との比較—, 物理探査, 第66巻, 第3号, 153-165, 2013年
- 14) 佐藤浩章(2010)：地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その4) —地表に近い岩盤における減衰定数の評価と速度の揺らぎとの関係—, 電力中央研究所報告, N10004, 2010年8月