

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評価の概要について

〔参考資料〕

2021年6月11日  
九州電力株式会社



余 白

1. 改正基準の概要
2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の概要
3. 地下構造モデルの設定
4. 地震基盤相当面の設定
5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成
6. 解放基盤表面における地震動の設定
7. 基準地震動の策定

【参考1】 仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

【参考2】 複数の方法による模擬地震波の検討

【参考3】 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

## 1. 改正基準の概要

- 「**「实用発電用原子炉及びその付属施設の位置、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**

（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. 改正基準の概要

つづき

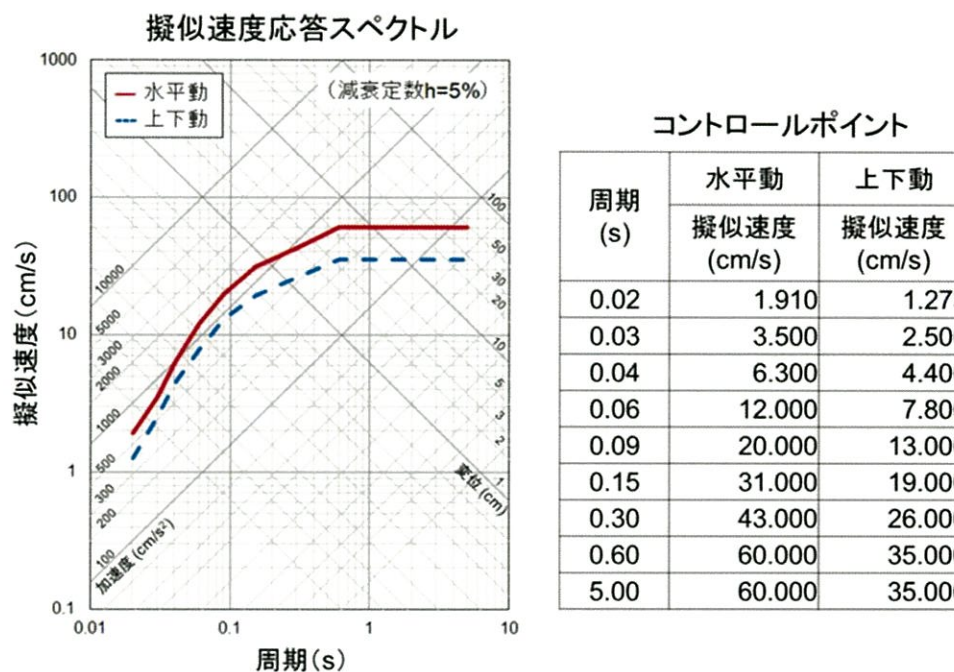


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- 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. 改正基準の概要

## 現行の基準地震動（平成26年9月10日許可）の最大加速度

(単位：cm/s<sup>2</sup>)

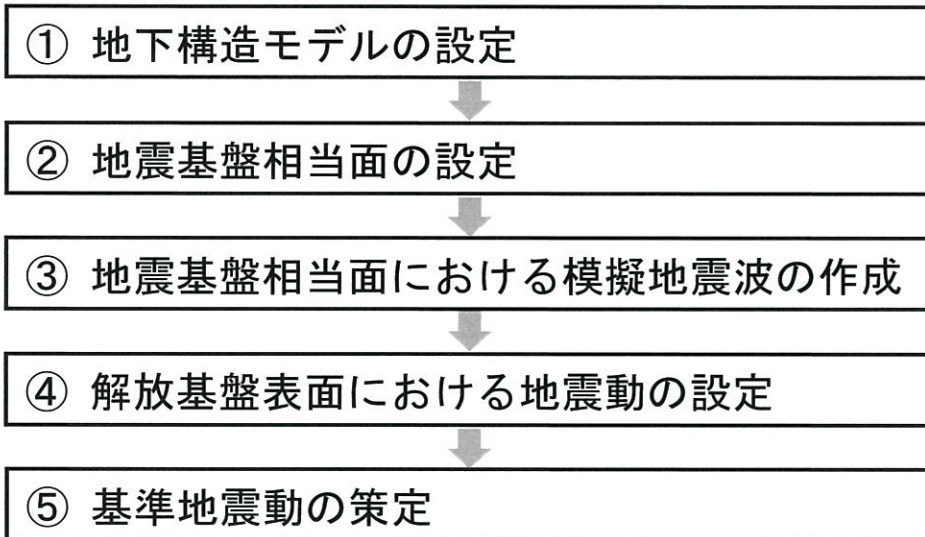
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540	324
断層モデルを用いた手法		Ss-1に包絡		
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
地域性を考慮する地震動(Mw6.5程度以上)		該当なし		
全国共通で考慮すべき地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-2	620	320
	標準応答スペクトル	今回検討		

(単位：cm/s<sup>2</sup>)

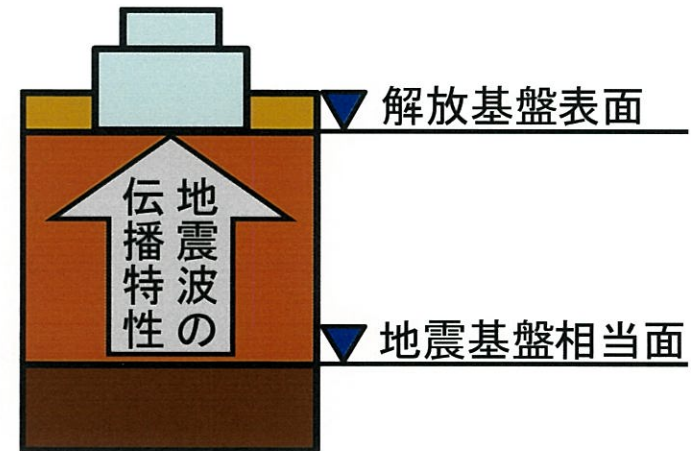
免震構造施設設計用基準地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		Ss-L	400	240

## 2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の概要

- 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（ $Ss-1$ 及び $Ss-2$ ）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  
の評価の流れ



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. 地下構造モデルの設定

- 既許可（平成26年9月10日許可）では、「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、解放基盤表面以深の地下構造モデルを設定。
- 上記地下構造モデルは、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」における「ハイブリッド合成法」（短周期帯：経験的グリーン関数法、長周期帯：理論的方法）のうち長周期帯の理論的方法による評価に採用。

#### 地下構造モデル再設定のまとめ

■ 見直し後の地下構造モデルは、微動アレイにより求められた観測位相速度と整合しており、平均的な地下構造特性を踏まえている。

長周期帯の理論的方法に用いる一次元地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Q 値	備考
解放基盤表面 -18.5m	1	0.0	2.70	1.50	3.20	100	試掘坑内 弾性波試験
-28.5m	2	-0.01	2.70	1.60	3.70	100	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
-480m	3	-0.462	2.70	2.15	4.40	200	微動アレイの速度構造を基に設定
-1018.5m	4	-1.0	2.70	3.01	5.20	200	宮腰ほか(2004) <sup>8)</sup>
-2018.5m	5	-2.0	2.70	3.24	5.60	300	
-3018.5m	6	-3.0	2.70	3.50	5.90	300	
-17018.5m	7	-17.0	3.00	3.80	6.60	500	地震調査委員会 (2003) <sup>9)</sup>
-33018.5m	8	-33.0	3.30	4.30	7.60	500	

第114回  
審査会合資料



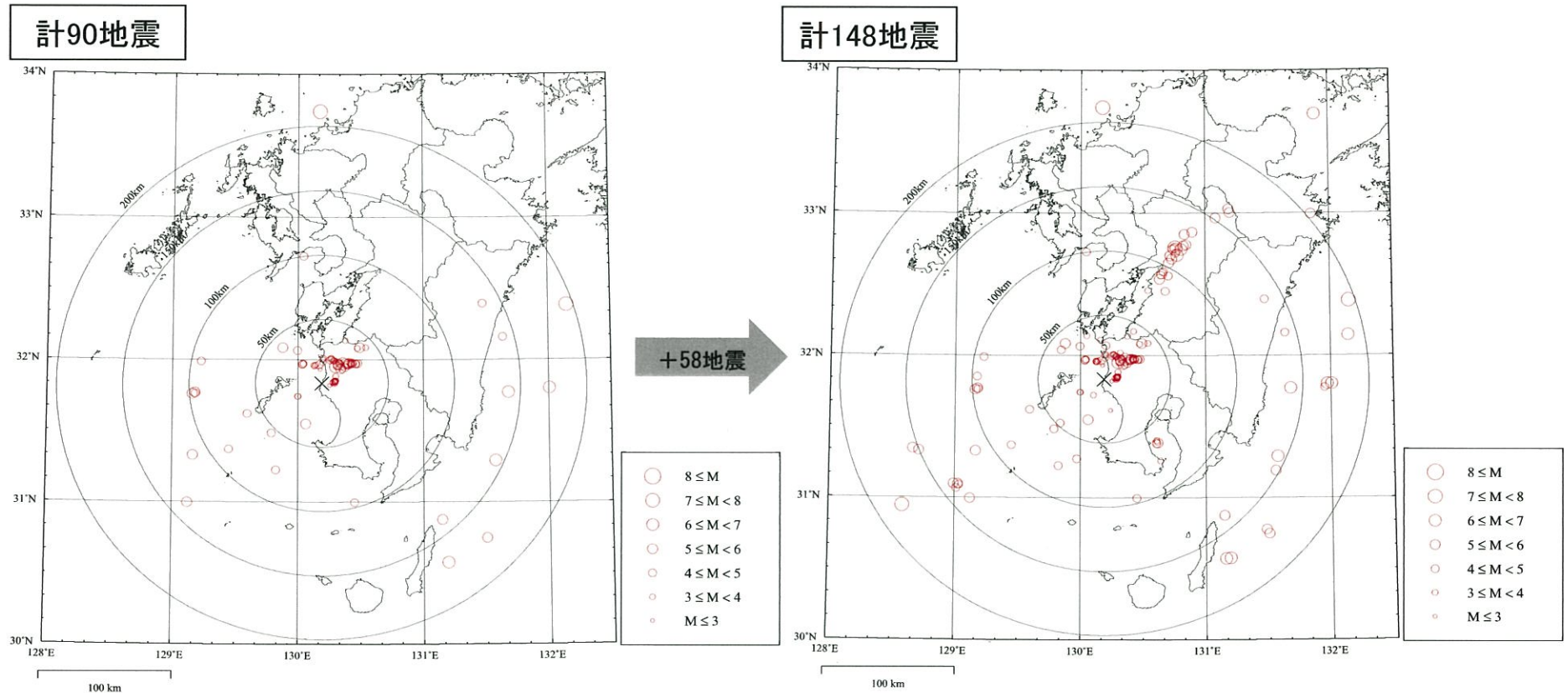
### 3. 地下構造モデルの設定

- 既許可（平成26年9月10日許可）以降、更なる安全性・信頼性の向上を目的に、継続的に敷地地盤における地震観測を実施するとともに、最新の技術的知見やデータの取得に努めてきた。
- これらの既許可以降に取得した地震観測記録や最新の技術的知見等も含めた多面的な検討により、地下構造モデルを精緻化。
- なお、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価では、短周期側も対象とした地盤減衰の設定が必要。
- 次頁以降で以下の検討及び検証を行い、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設定。
  - ① 敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び検証
    - ・ 伝達関数による検討
    - ・ 地震波干渉法による検討
    - ・ 応答スペクトルによる検証
  - ② 精緻化範囲の設定及び検証
    - ・ 原子炉設置位置付近の速度層断面による設定
    - ・ 地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

### 3. 地下構造モデルの設定

#### ① 敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び検証

- 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58地震の観測記録を取得。  
(計148地震の観測記録)
- これらの地震観測記録を用いて、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の地盤減衰の検討を実施。



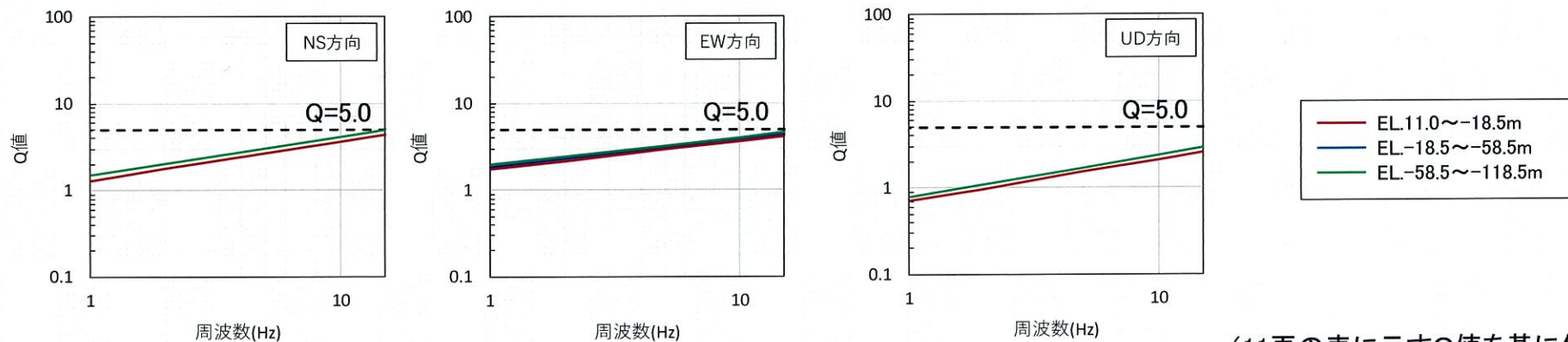
敷地地盤における観測地震の震央分布  
(観測開始～既許可時審査)

敷地地盤における観測地震の震央分布  
(観測開始～2019年度)

### 3. 地下構造モデルの設定

#### 伝達関数による検討

- 既許可時審査において、敷地地盤で観測された主な5地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤同定を実施（11、12頁参照）。
- 既許可時審査において、同定された地盤減衰（Q値）の下限は $Q=5.0$ 程度。



(11頁の表に示すQ値を基に作図)

伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11.0m~EL.-118.5m)

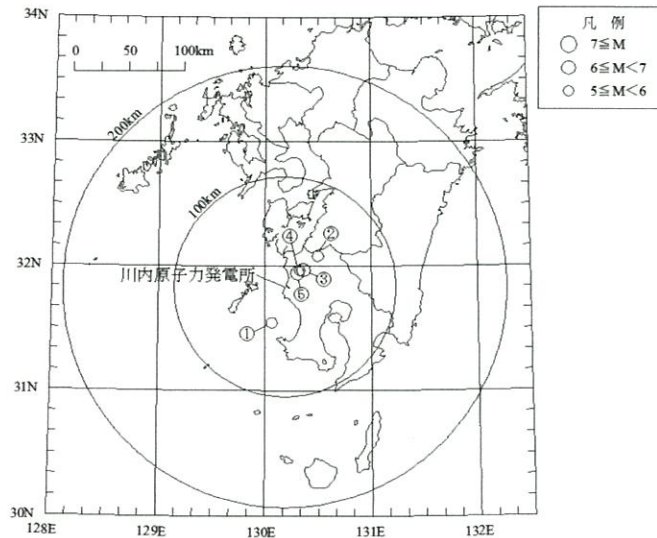
### 3. 地下構造モデルの設定

第18回  
審査会合資料

地震観測記録を用いた地盤同定による浅部地下構造の評価

#### ○地震観測記録を用いた浅部地下構造同定の概要

- ・ 敷地で観測された地震観測記録を用いた逆解析により、EL.-118.5mまでの浅部地下構造を同定し、理論的方法による地下構造モデルの検証を行う。
- ・ 同定手法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とする。
- ・ 検討対象地震は、敷地で観測された主な5地震を対象とする。



検討対象地震

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

#### NS方向 【地下構造モデル同定結果】

層	層上面 EL (m)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (km/s)	減衰	
				Q <sub>0</sub>	$\alpha$
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
4	-118.5	2.70	1.80	1.47	0.45

#### EW方向

層	層上面 EL (m)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (km/s)	減衰	
				Q <sub>0</sub>	$\alpha$
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
4	-118.5	2.70	1.80	1.94	0.32

#### UD方向

層	層上面 EL (m)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vp (km/s)	減衰	
				Q <sub>0</sub>	$\alpha$
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
4	-118.5	2.70	4.40	0.81	0.48

※ $Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

### 3. 地下構造モデルの設定

#### 再設定した地下構造モデルと鉛直アレイ地震観測記録による伝達関数の比較

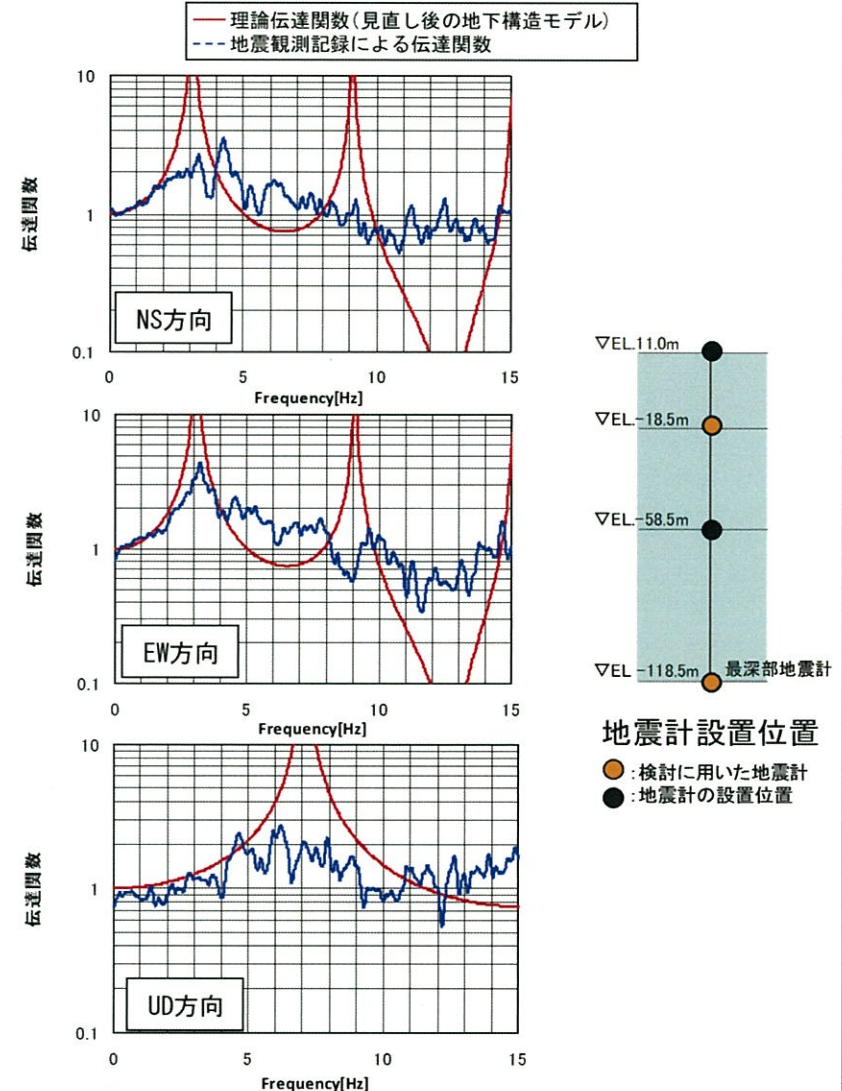
第114回  
審査会合資料

■ 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 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加

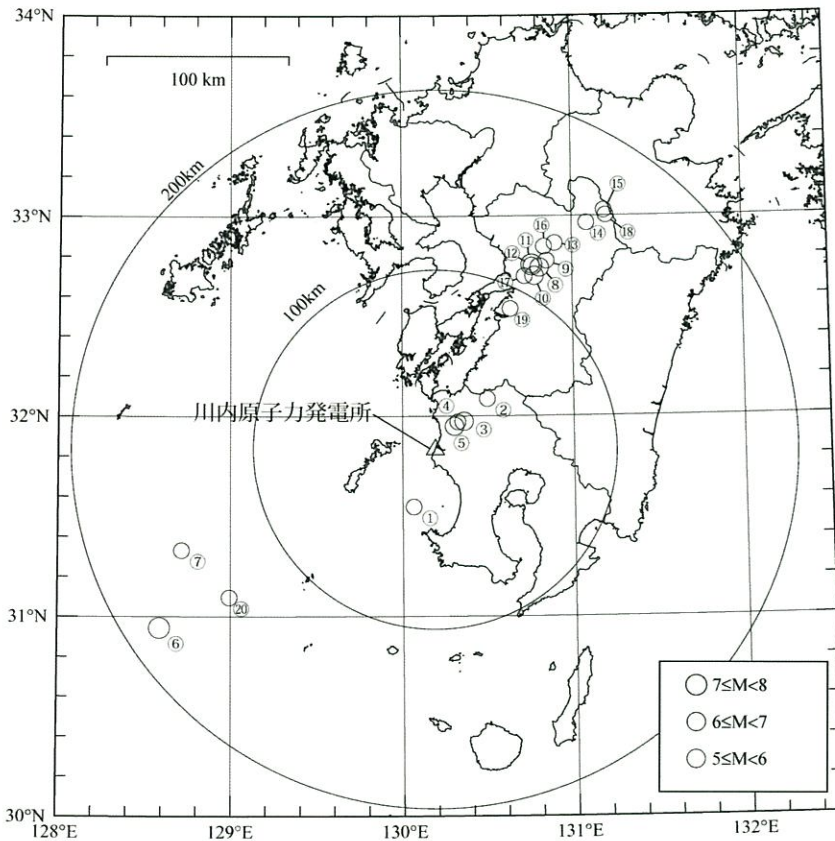


伝達関数の比較 (EL. -18.5m/EL. -118.5m)

### 3. 地下構造モデルの設定

- 既許可時審査と同様の観点（M5.4以上、震央距離200km以内）で、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地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤減衰の同定を実施。

伝達関数による地盤減衰の同定に用いた地震諸元  
(計20地震)



伝達関数による地盤減衰の同定に用いた地震の震央位置  
(計20地震)

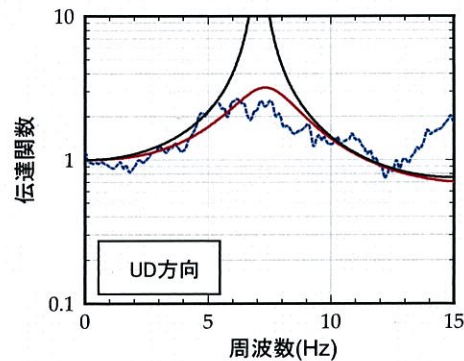
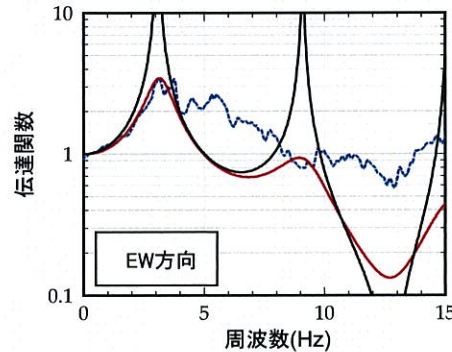
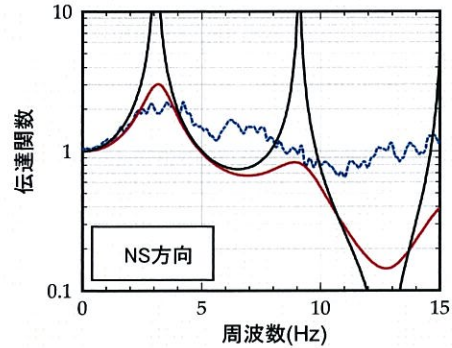
既許可時審査  
↑  
↓  
今回新たに追加

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	128
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88
⑳	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140

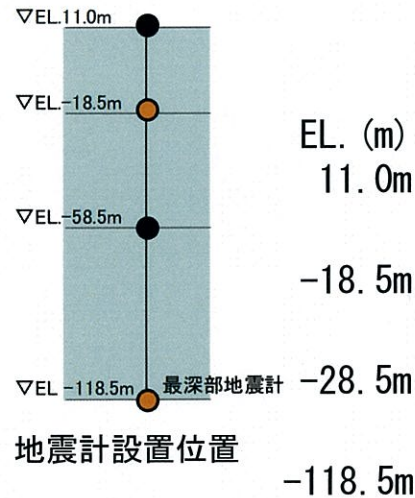
### 3. 地下構造モデルの設定

..... 地震観測記録 (20地震) による平均伝達関数  
 — 理論伝達関数 (今回同定結果)  
 — 理論伝達関数 (既許可地下構造モデル)

- 層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰 (Q値) を同定。
- 同定された地盤減衰 (Q値) の下限はQ=5.9程度。



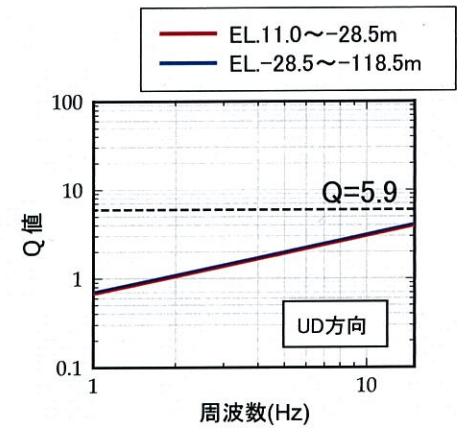
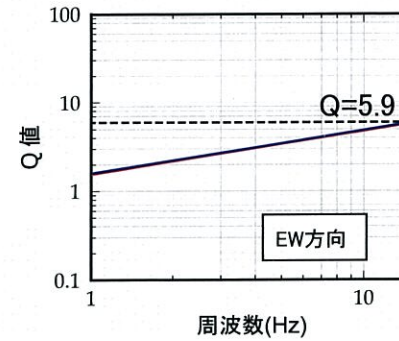
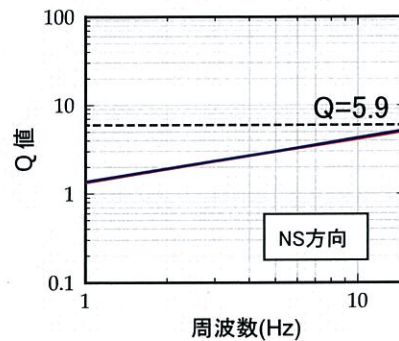
今回の伝達関数の比較  
(EL.-18.5m/EL.-118.5m)



地下構造モデル (既許可)

EL. (m)	層	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)
11.0m	0	2.7	1500	3200
-18.5m	1	2.7	1500	3200
-28.5m	2	2.7	1600	3700

※解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に0層を追加

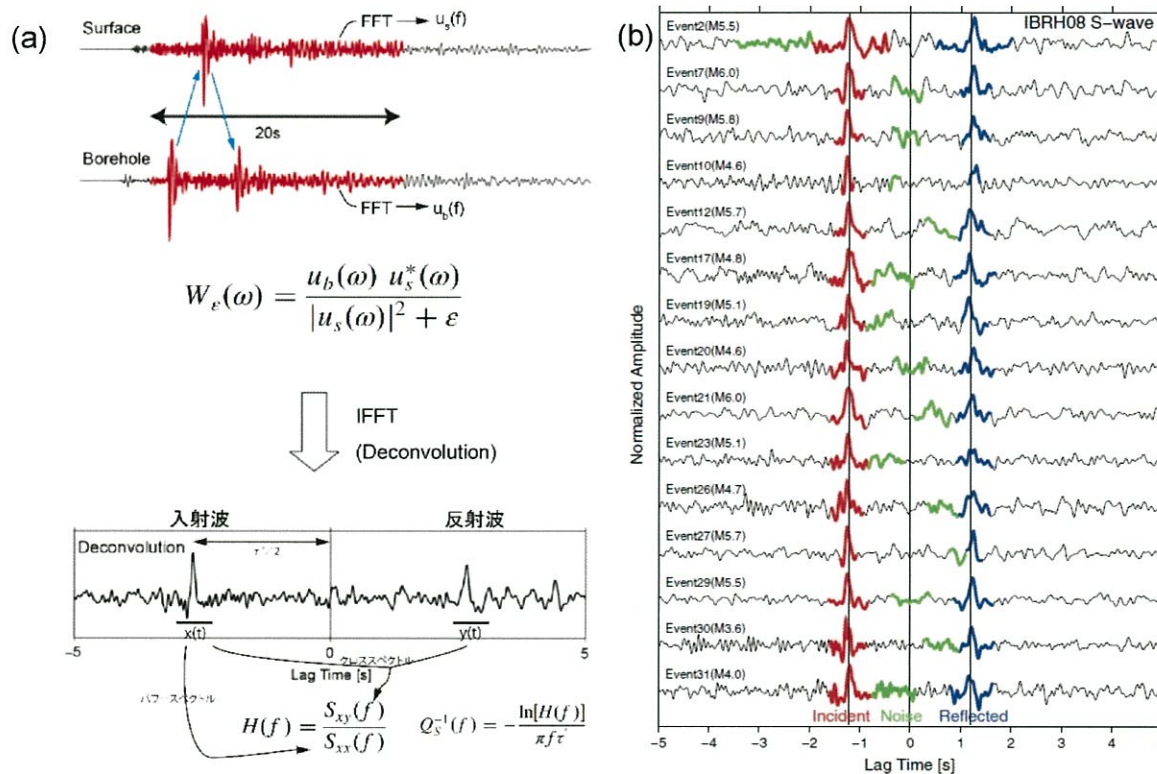


伝達関数により同定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-118.5m)

### 3. 地下構造モデルの設定

#### 地震波干渉法による検討

- 既許可時審査以降の最新の技術的知見として、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から直接地盤減衰（Q値）を推定可能な地震波干渉法<sup>1),2)</sup>を用いた検討を実施。
- 地中の地震観測記録には、鉛直下方から入射された波動が地表で反射し、反射波が記録されるため、地表の観測記録に対して地中記録をデコンボリューションすると、入射波と反射波が分離。
- この入射波に対する反射波の振幅の比率に基づき、地盤減衰（Q値）を推定。



Fukushima et al.(2016)  
(一部加筆)

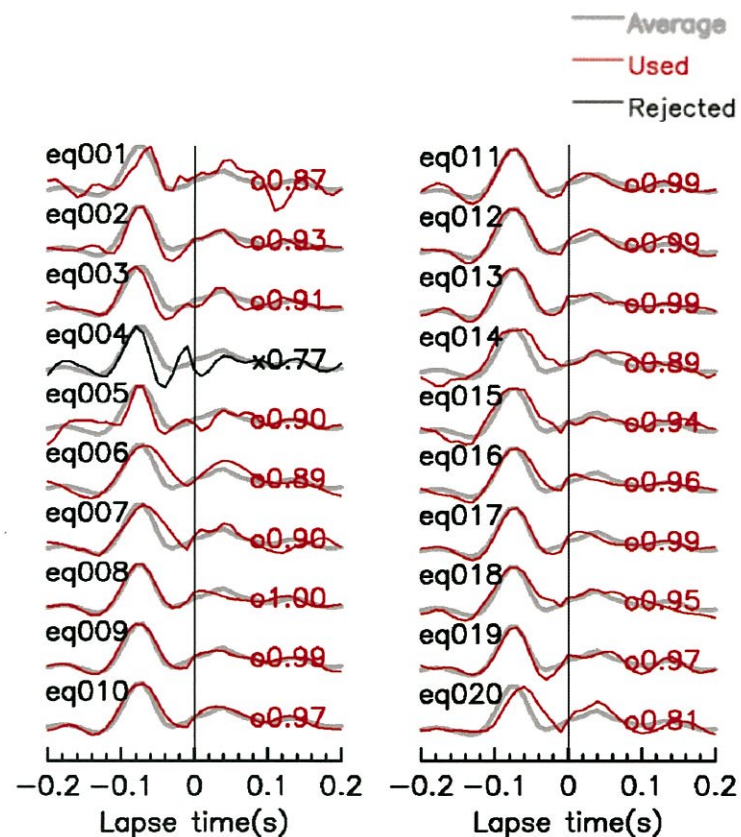


### 3. 地下構造モデルの設定

- 地震波干渉法による地盤減衰の推定は、伝達関数による地盤減衰の同定に用いた計20地震の観測記録を対象として実施。
- 地盤減衰の推定にあたっては、Anderson (2004)<sup>3)</sup>による指標を基に、全地震の波形の平均と各地震の波形の相関がよいものを抽出。

地震波干渉法による地盤減衰の推定に用いた地震諸元  
(計20地震)

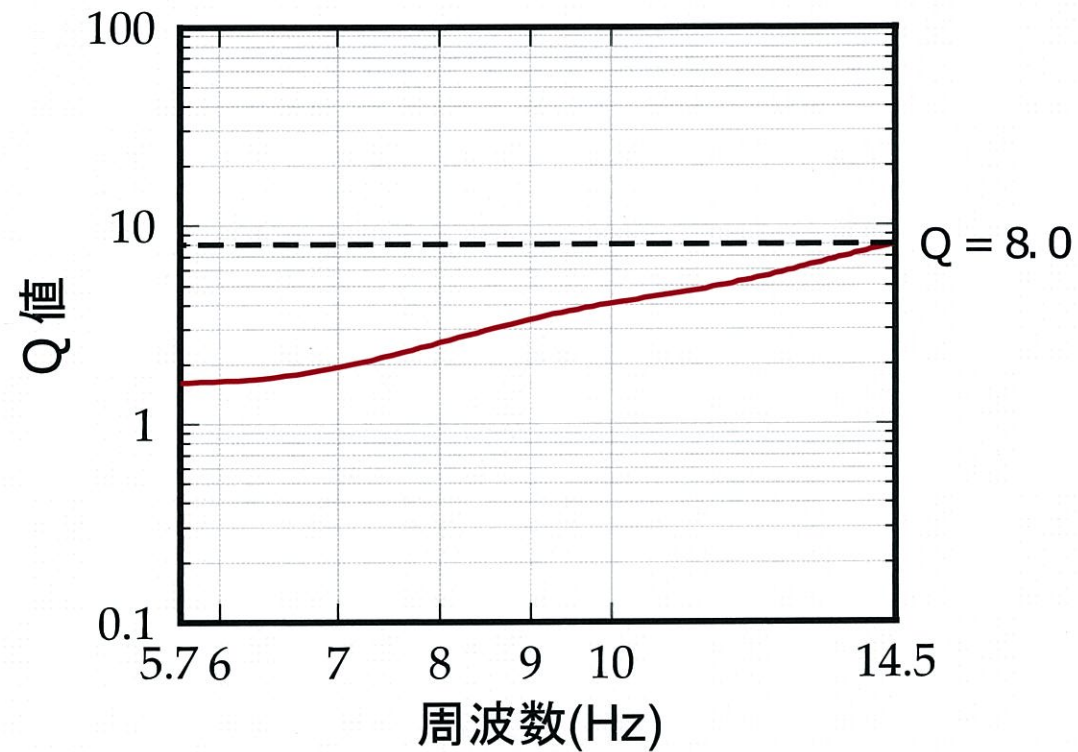
番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	128
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88
⑳	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140



全地震の波形の平均と各地震の波形の相関

### 3. 地下構造モデルの設定

- 地震波干渉法により推定された地盤減衰 (Q値) の下限は $Q=8.0$ 程度。

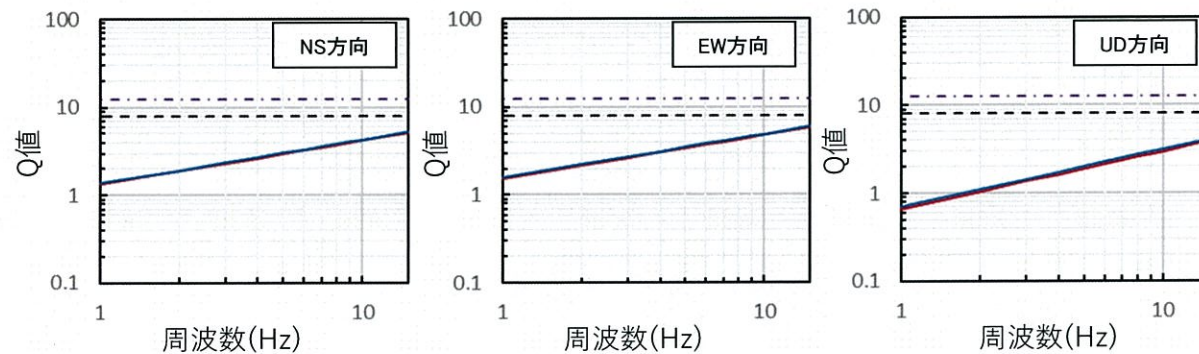
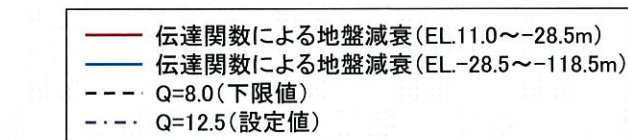


地震波干渉法により同定された地盤減衰  
(EL.11.0m~EL.-118.5m)

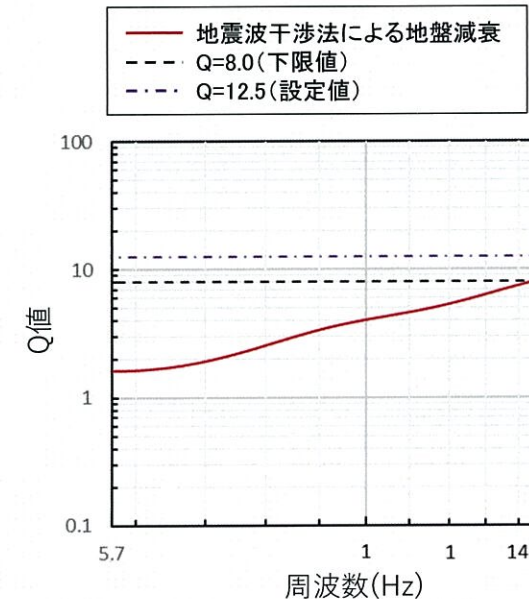
### 3. 地下構造モデルの設定

#### 地盤減衰 (Q値) の設定

- 敷地地盤の鉛直アレイ地震観測記録に基づく伝達関数による地盤減衰の同定結果及び地震波干渉法による地盤減衰の推定結果によると、地盤減衰 (Q値) の下限は  $Q=8.0$  程度。
- 地盤減衰の不確かさを考慮し、鉛直アレイ地震観測記録に基づく地盤減衰を  $Q=12.5$  と設定。



伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-118.5m)

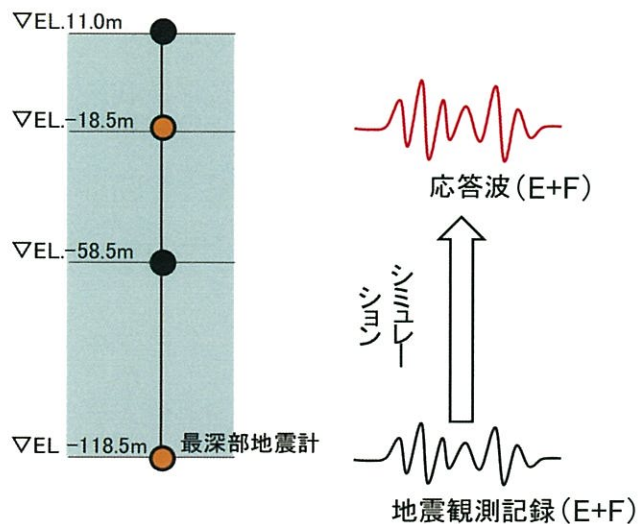


地震波干渉法により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-118.5m)

### 3. 地下構造モデルの設定

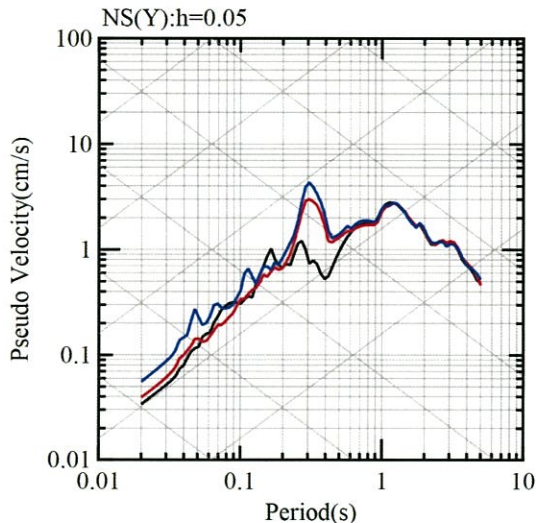
#### 応答スペクトルによる検証

- 鉛直アレイ地震観測記録に基づき、不確かさを考慮して設定した地盤減衰 ( $Q=12.5$ ) の検証のため、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、上記地盤減衰を設定した地下構造モデルによる1次元波動論に基づき、推定した解放基盤の深さ (EL. -18.5m) における応答波の応答スペクトルと同位置の地震計 (EL. -18.5m) 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。
- その結果、上記地盤減衰を設定した地下構造モデルを用いて推定した応答波の応答スペクトルは、地震観測記録の応答スペクトルより大きい傾向。

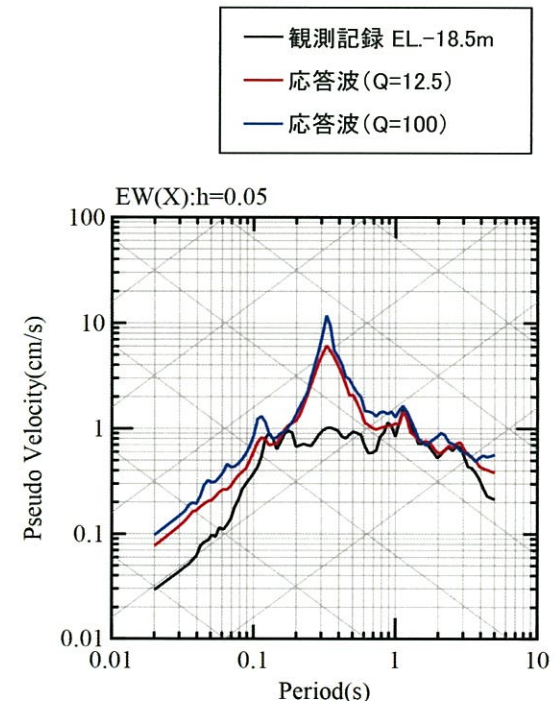


検証のイメージ

#### ①九州西側海域

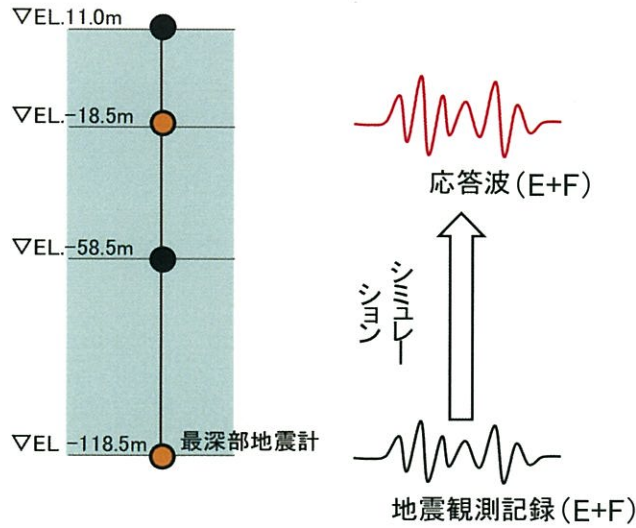


NS方向

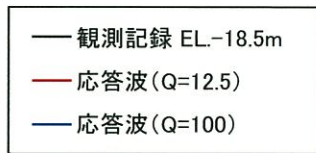


EW方向

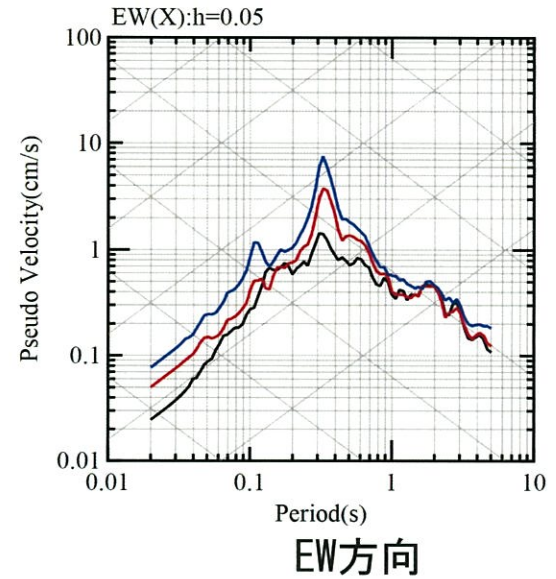
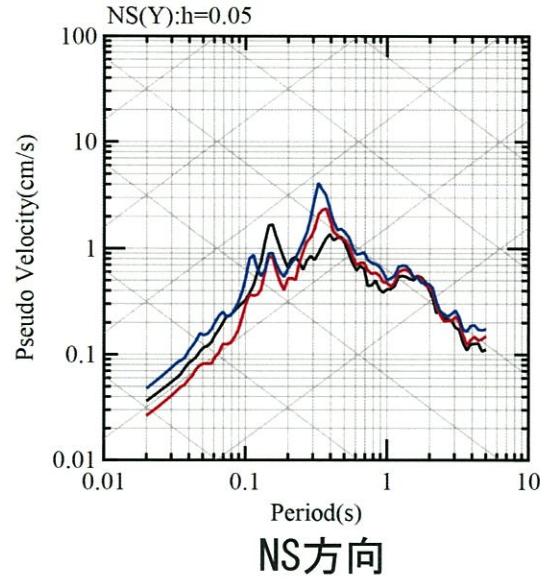
### 3. 地下構造モデルの設定



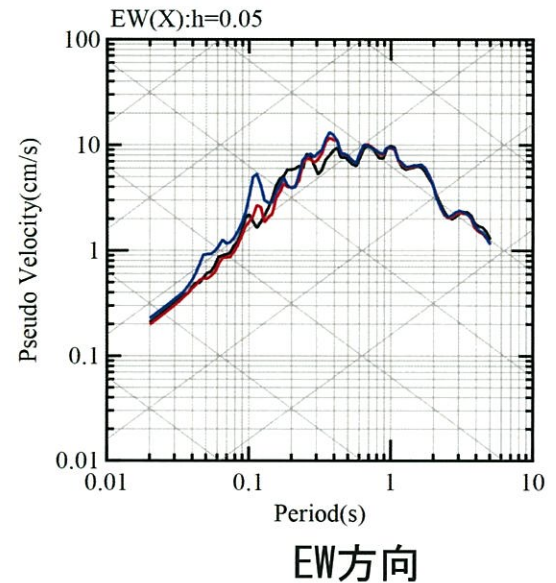
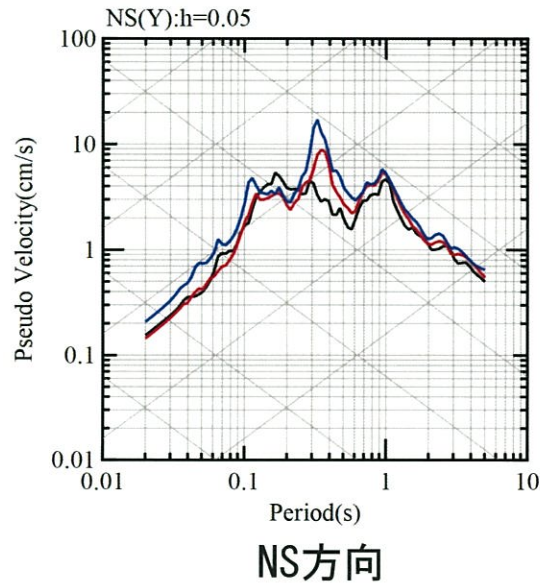
検証のイメージ



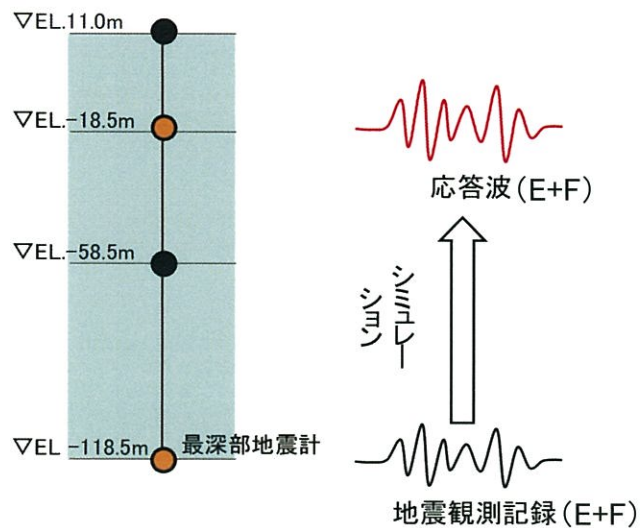
#### ② 鹿児島県北西部



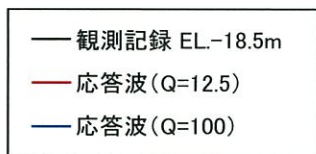
#### ③ 鹿児島県北西部



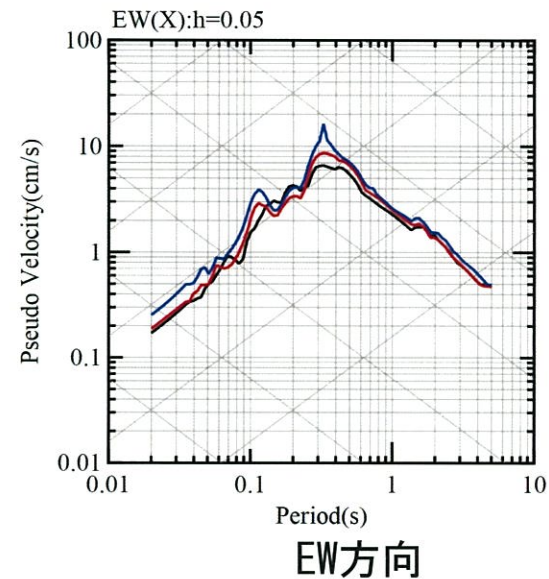
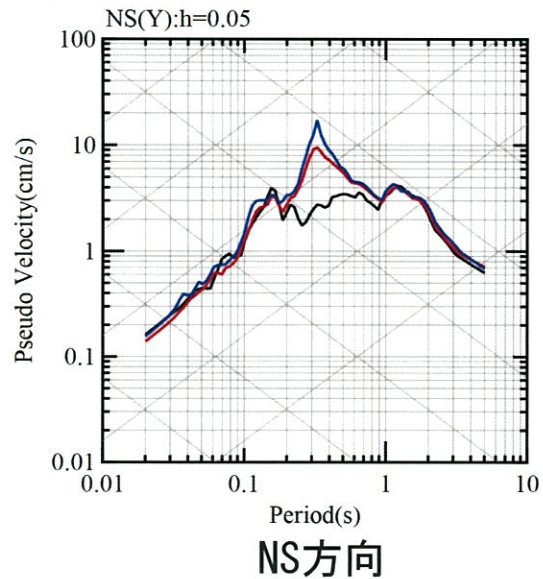
### 3. 地下構造モデルの設定



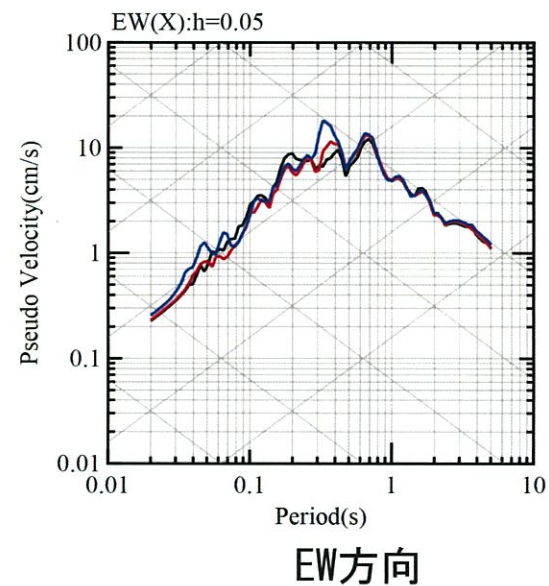
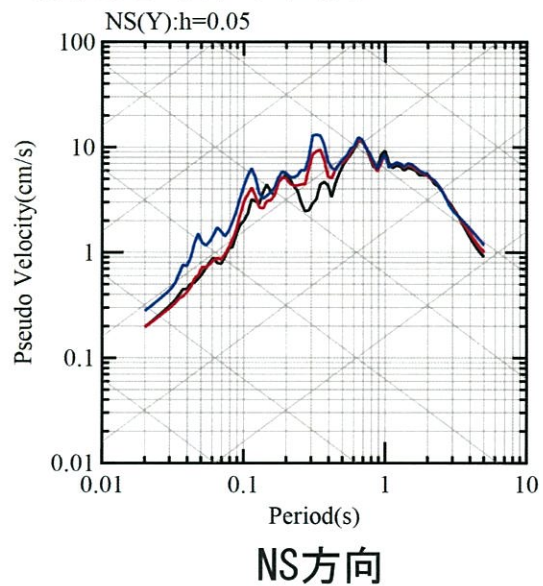
検証のイメージ



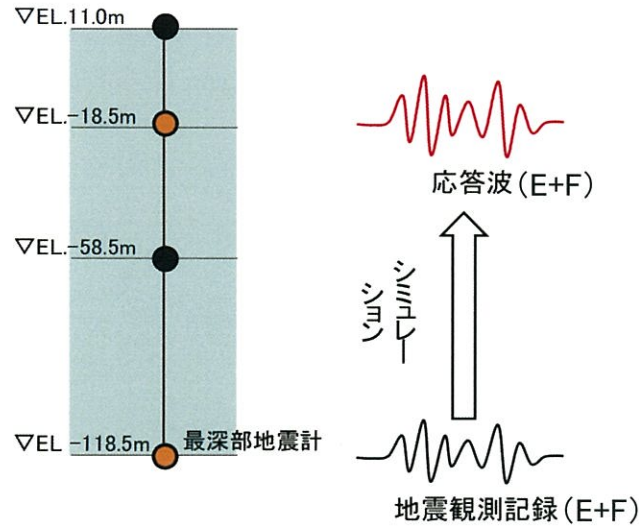
#### ④ 鹿児島県北西部



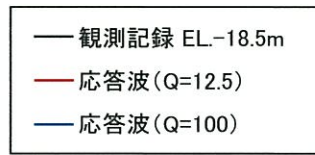
#### ⑤ 鹿児島県北西部



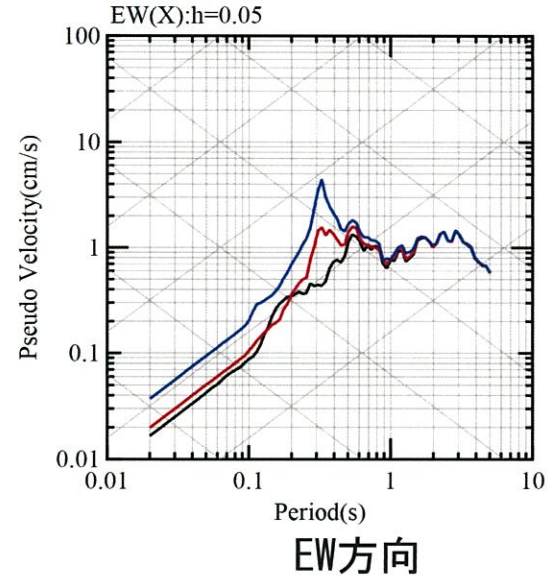
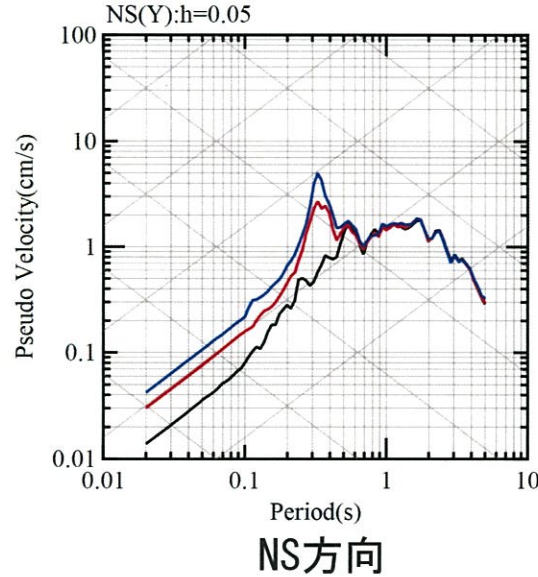
### 3. 地下構造モデルの設定



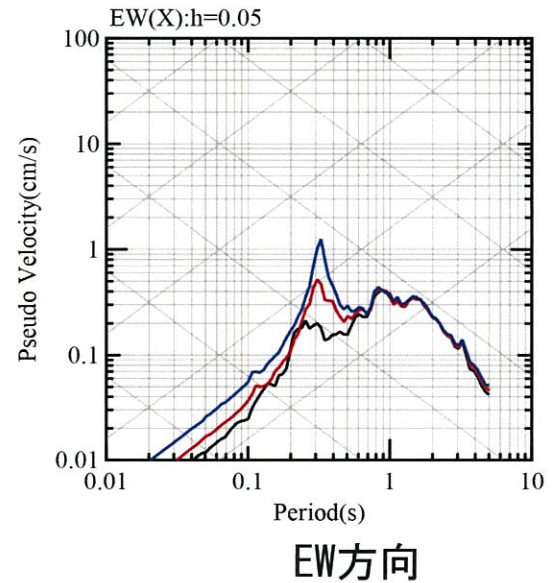
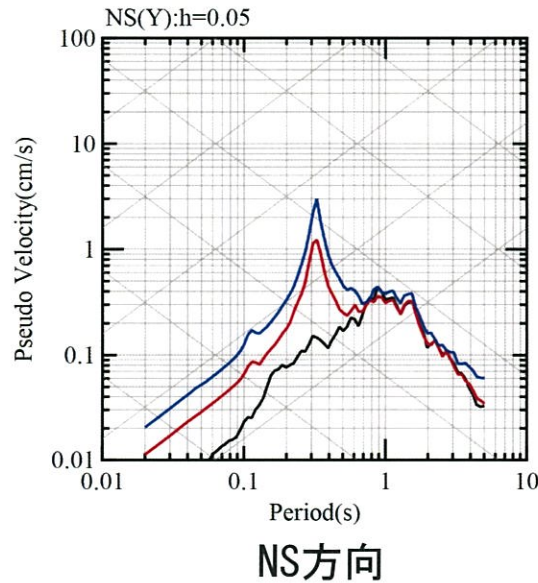
検証のイメージ



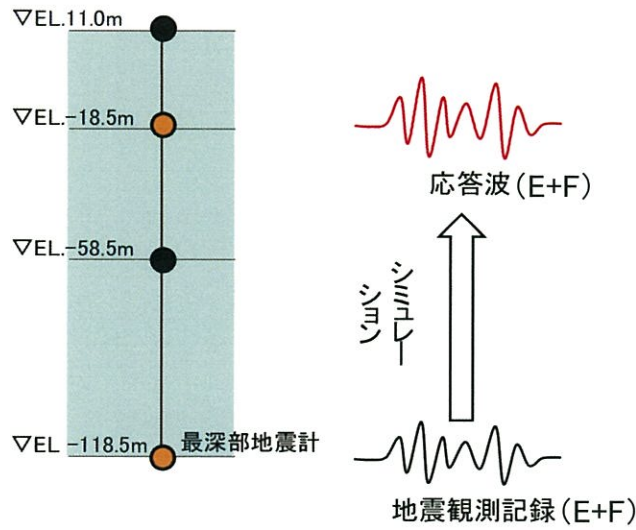
#### ⑥ 薩摩半島西方沖



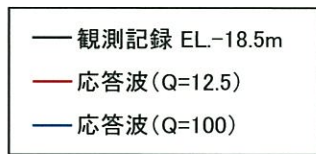
#### ⑦ 薩摩半島西方沖



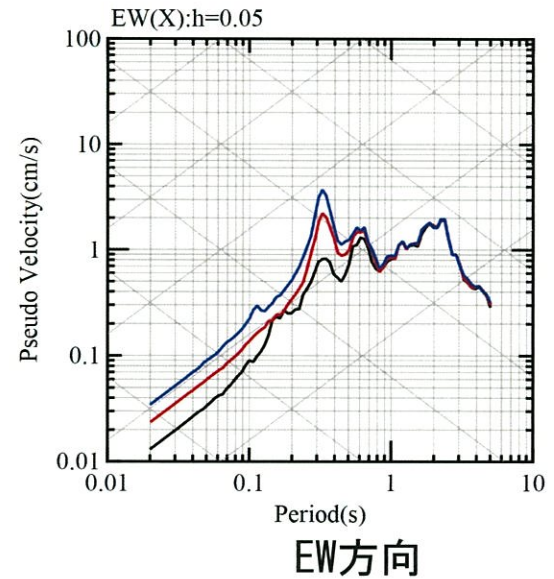
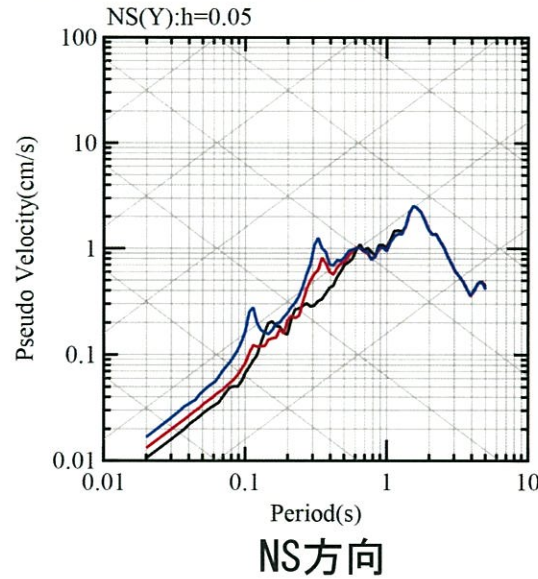
### 3. 地下構造モデルの設定



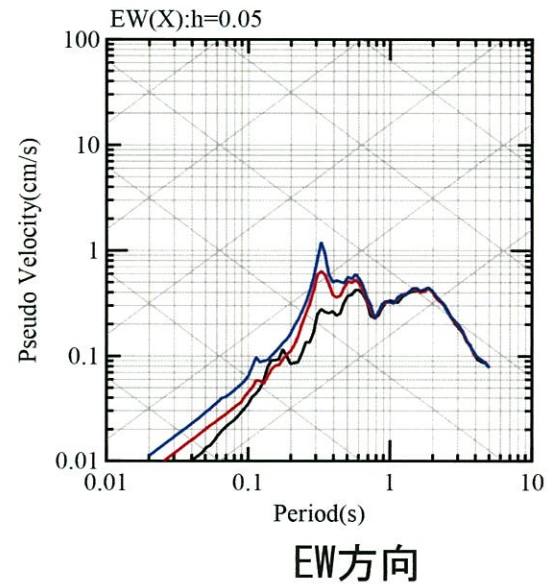
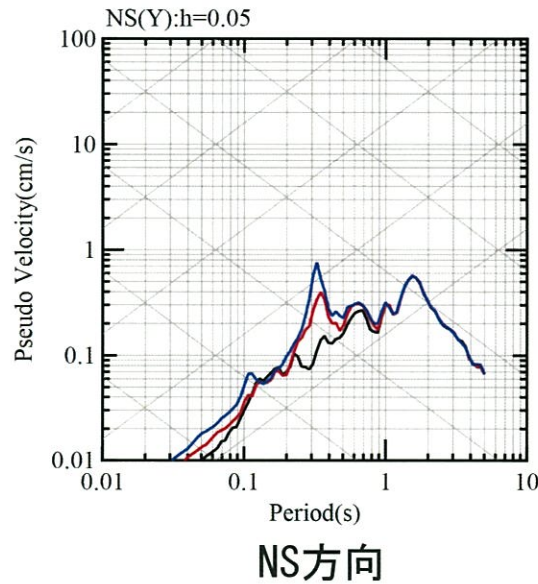
検証のイメージ



⑧熊本県熊本地方

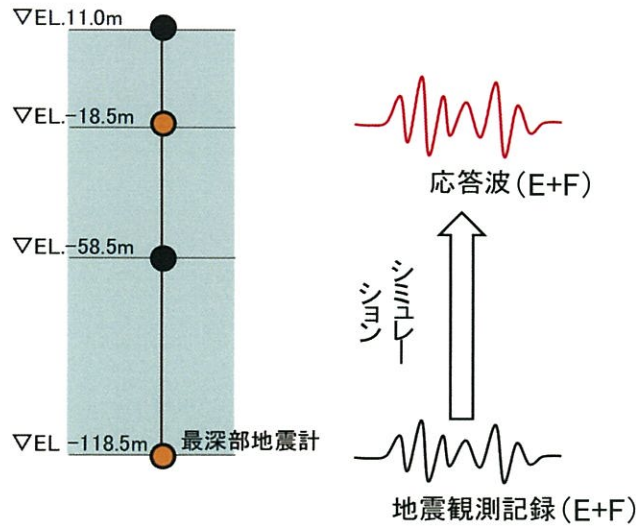


⑨熊本県熊本地方

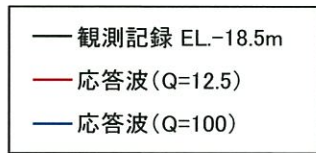




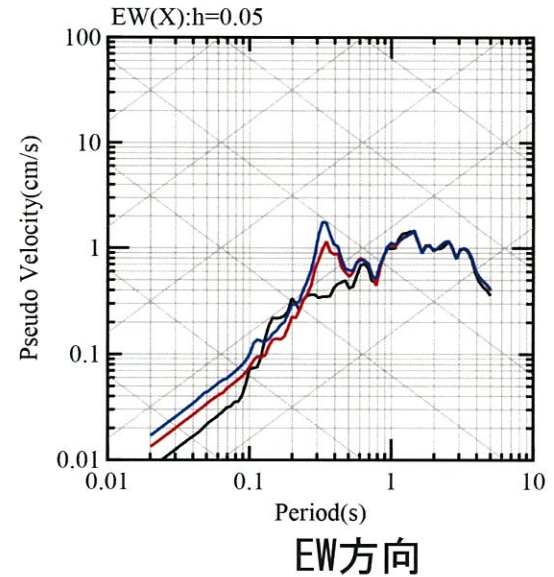
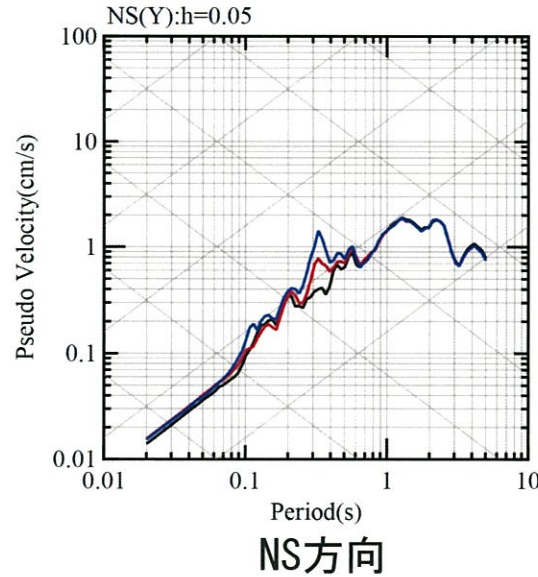
### 3. 地下構造モデルの設定



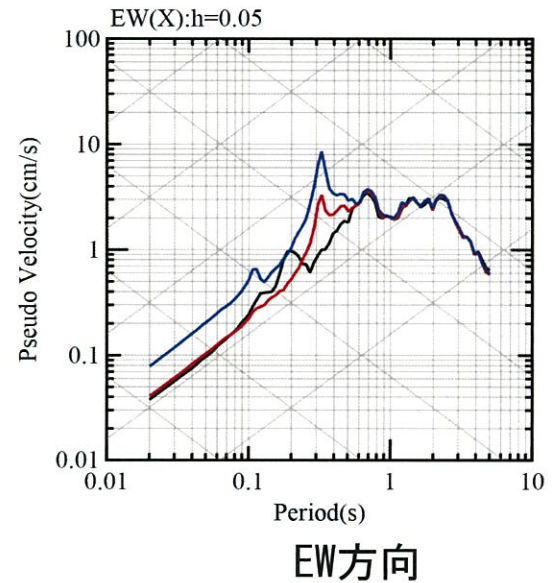
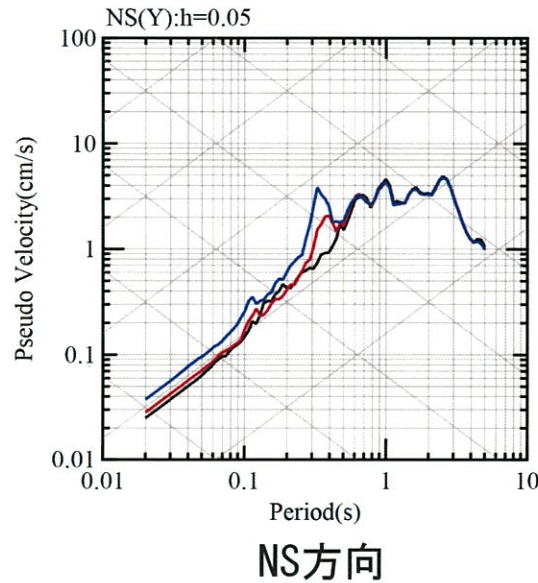
検証のイメージ



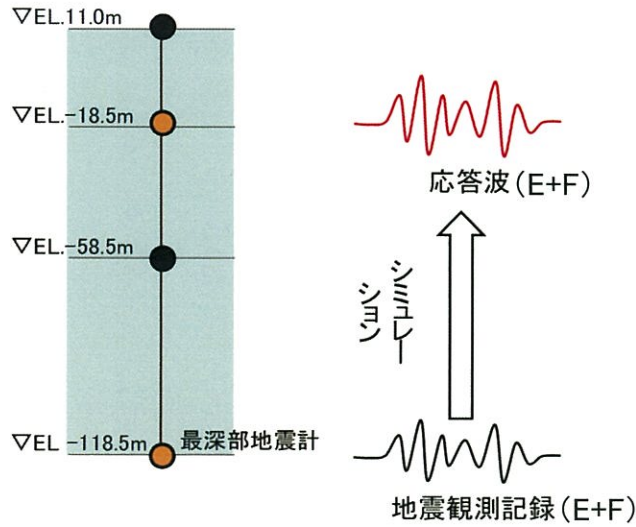
#### ⑩ 熊本県熊本地方



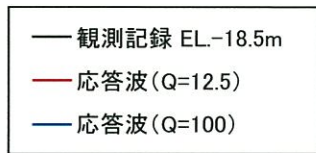
#### ⑪ 熊本県熊本地方



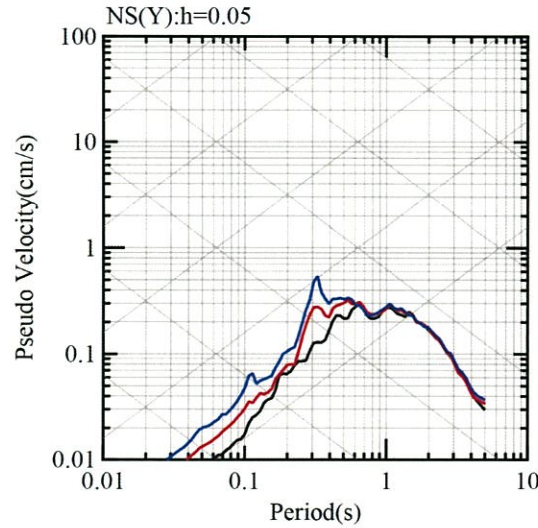
### 3. 地下構造モデルの設定



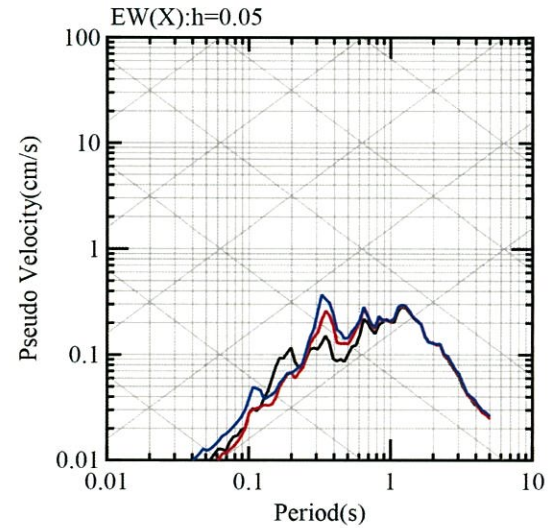
検証のイメージ



⑫ 熊本県熊本地方

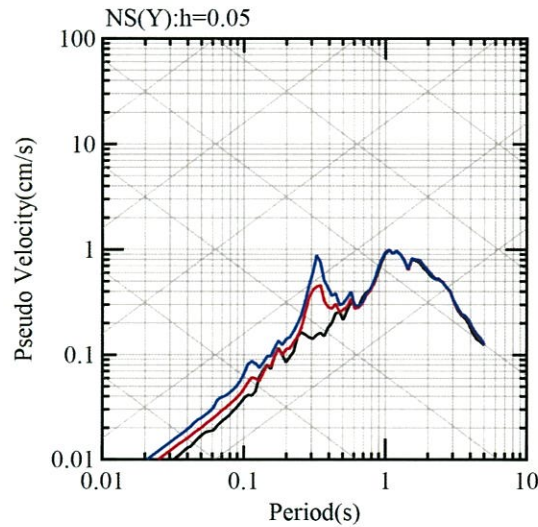


NS方向

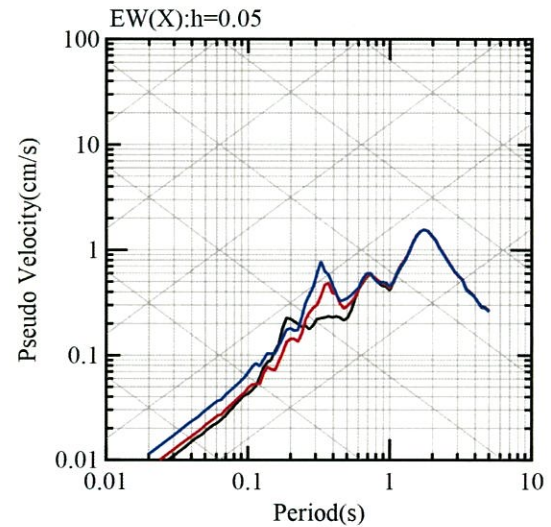


EW方向

⑬ 熊本県熊本地方

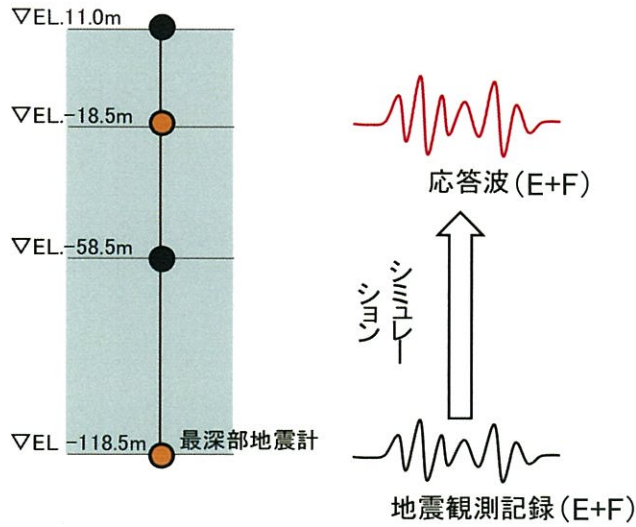


NS方向

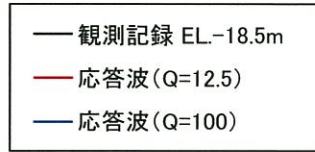


EW方向

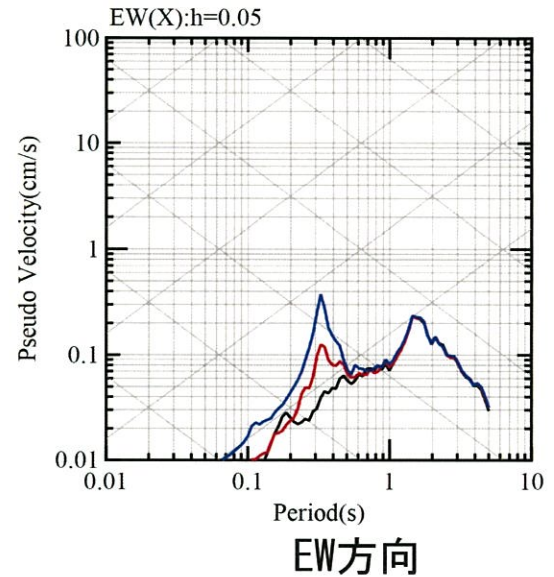
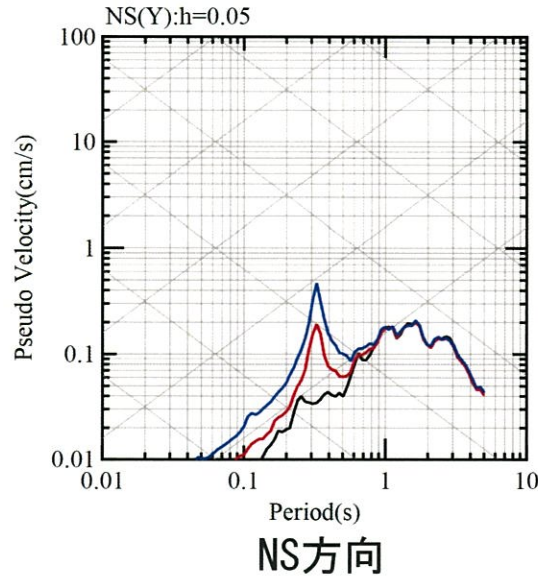
### 3. 地下構造モデルの設定



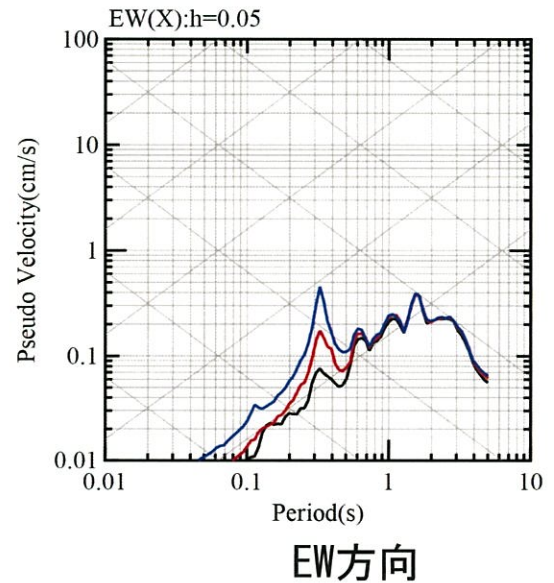
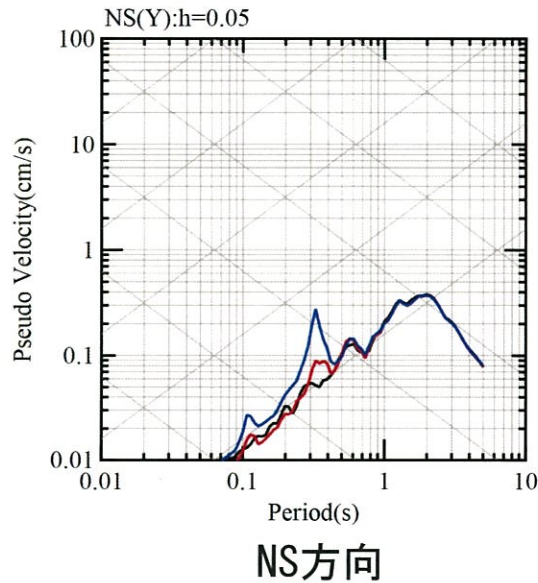
検証のイメージ



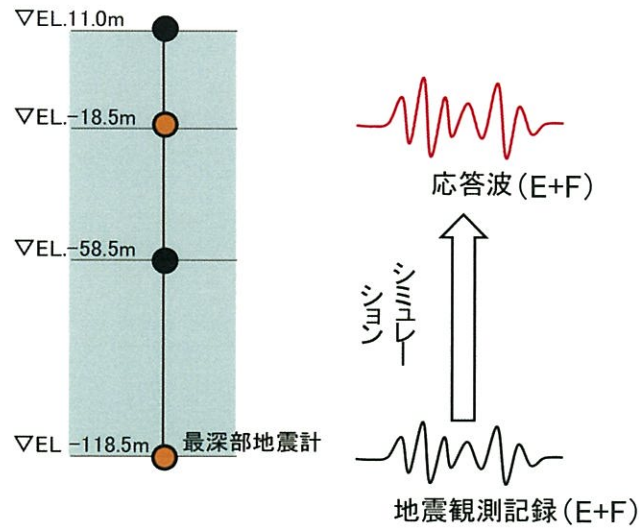
#### ⑭ 熊本県阿蘇地方



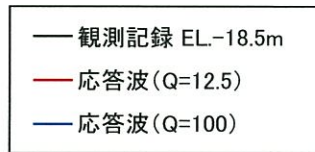
#### ⑮ 熊本県阿蘇地方



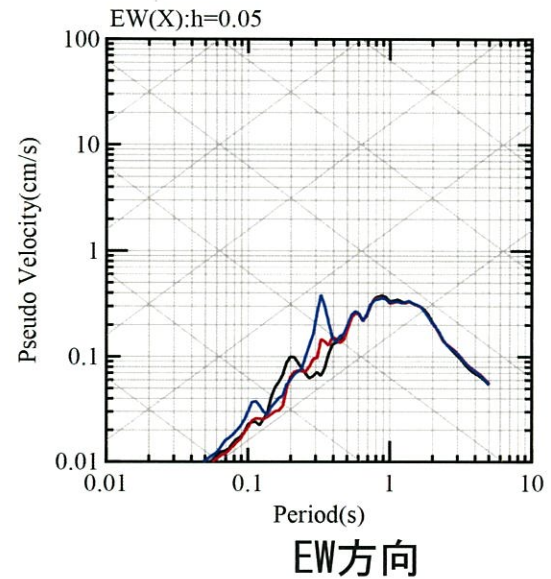
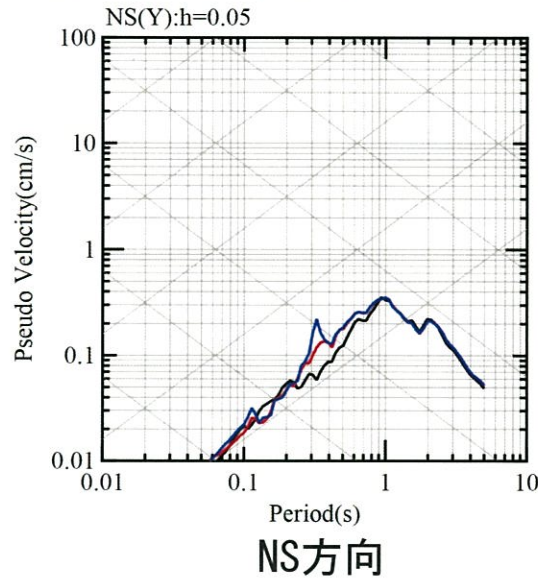
### 3. 地下構造モデルの設定



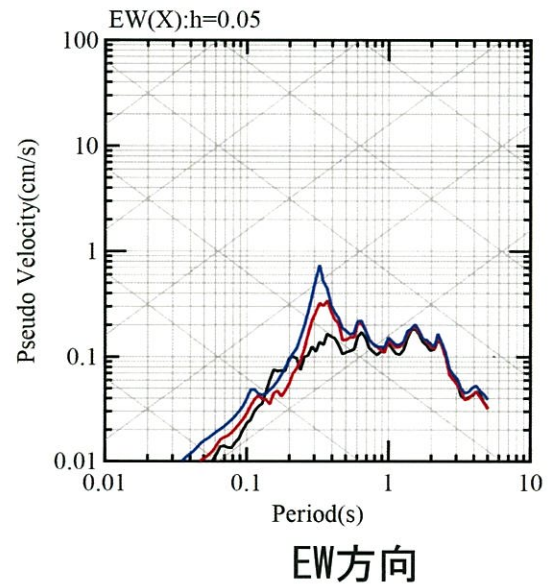
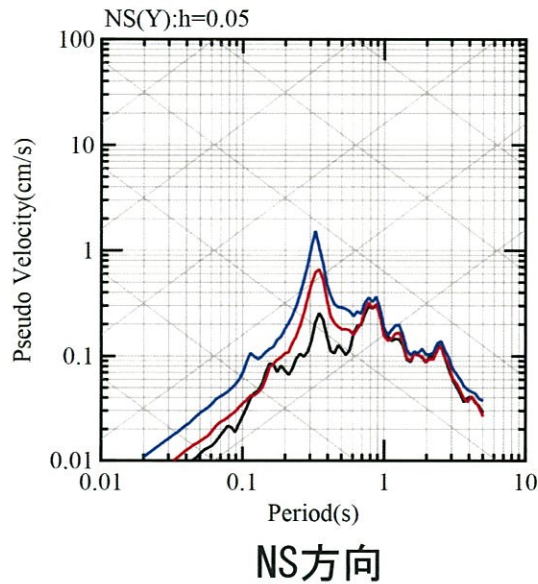
検証のイメージ



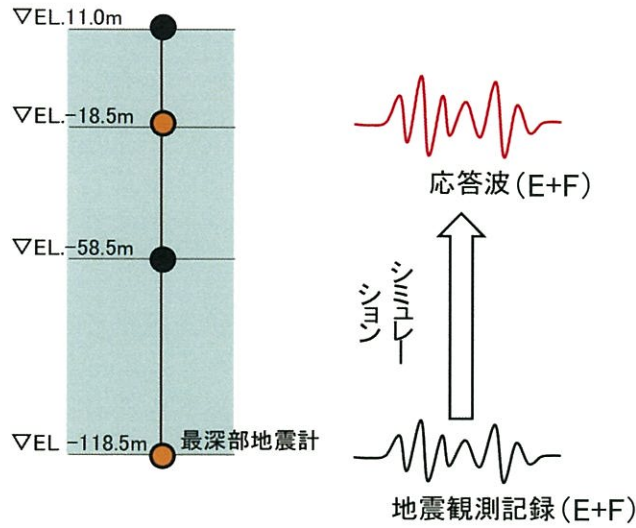
⑩熊本県熊本地方



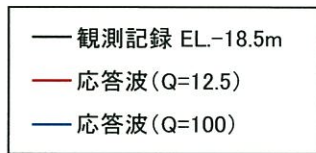
⑪熊本県熊本地方



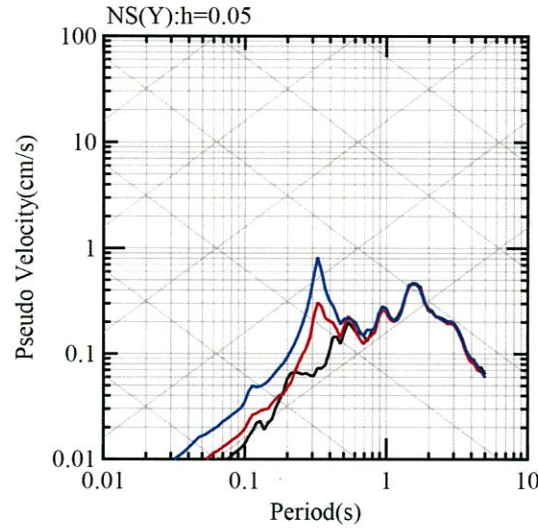
### 3. 地下構造モデルの設定



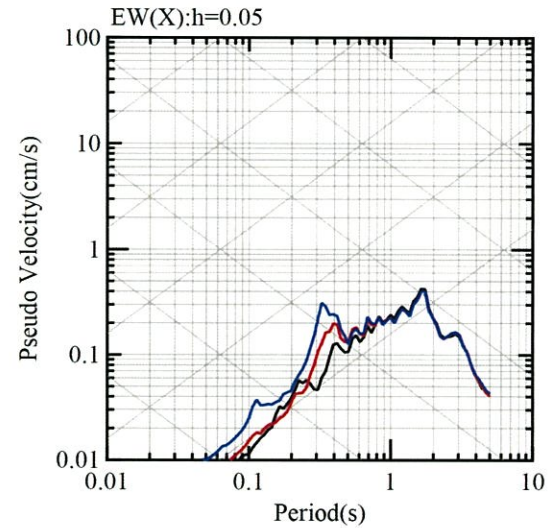
検証のイメージ



#### ⑱ 熊本県阿蘇地方

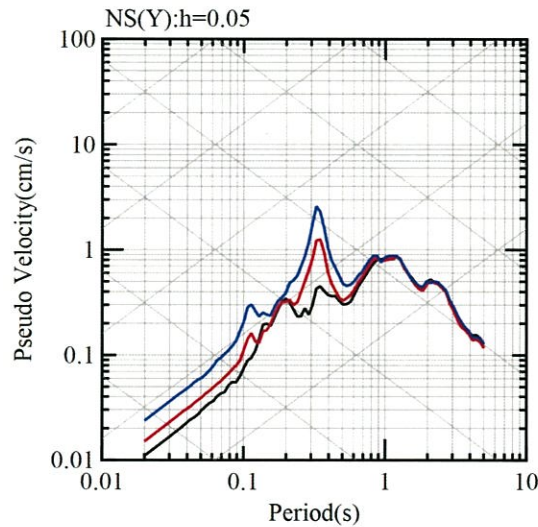


NS方向

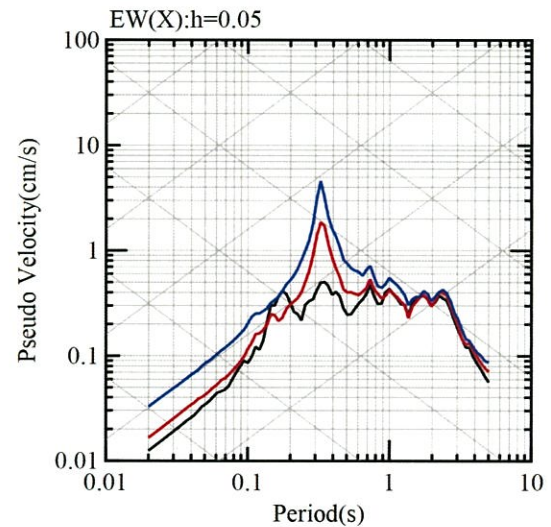


EW方向

#### ⑲ 熊本県熊本地方

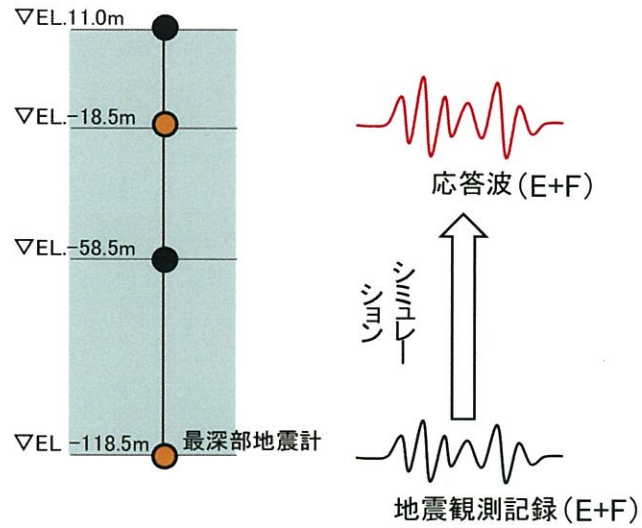


NS方向

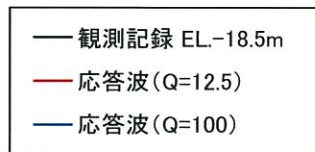


EW方向

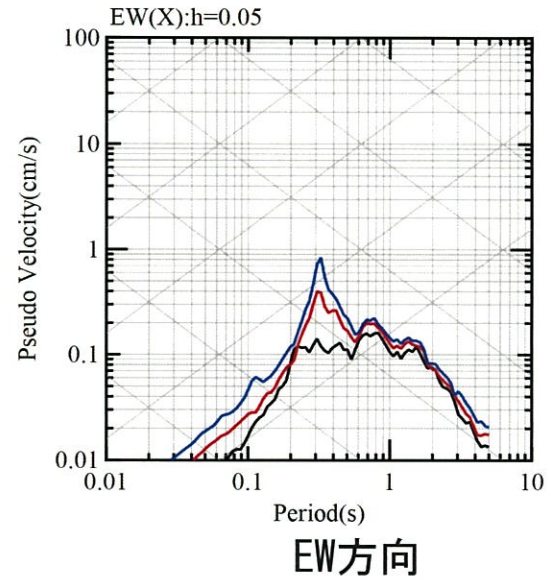
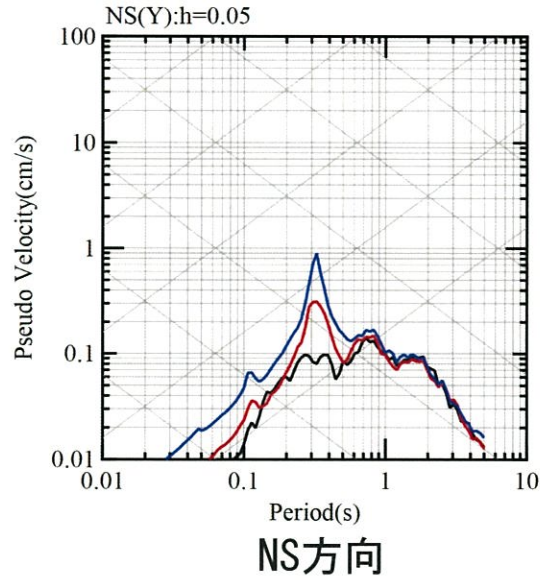
### 3. 地下構造モデルの設定



検証のイメージ



#### ⑳ 薩摩半島西方沖



### 3. 地下構造モデルの設定

#### ②精緻化範囲の設定及び検証

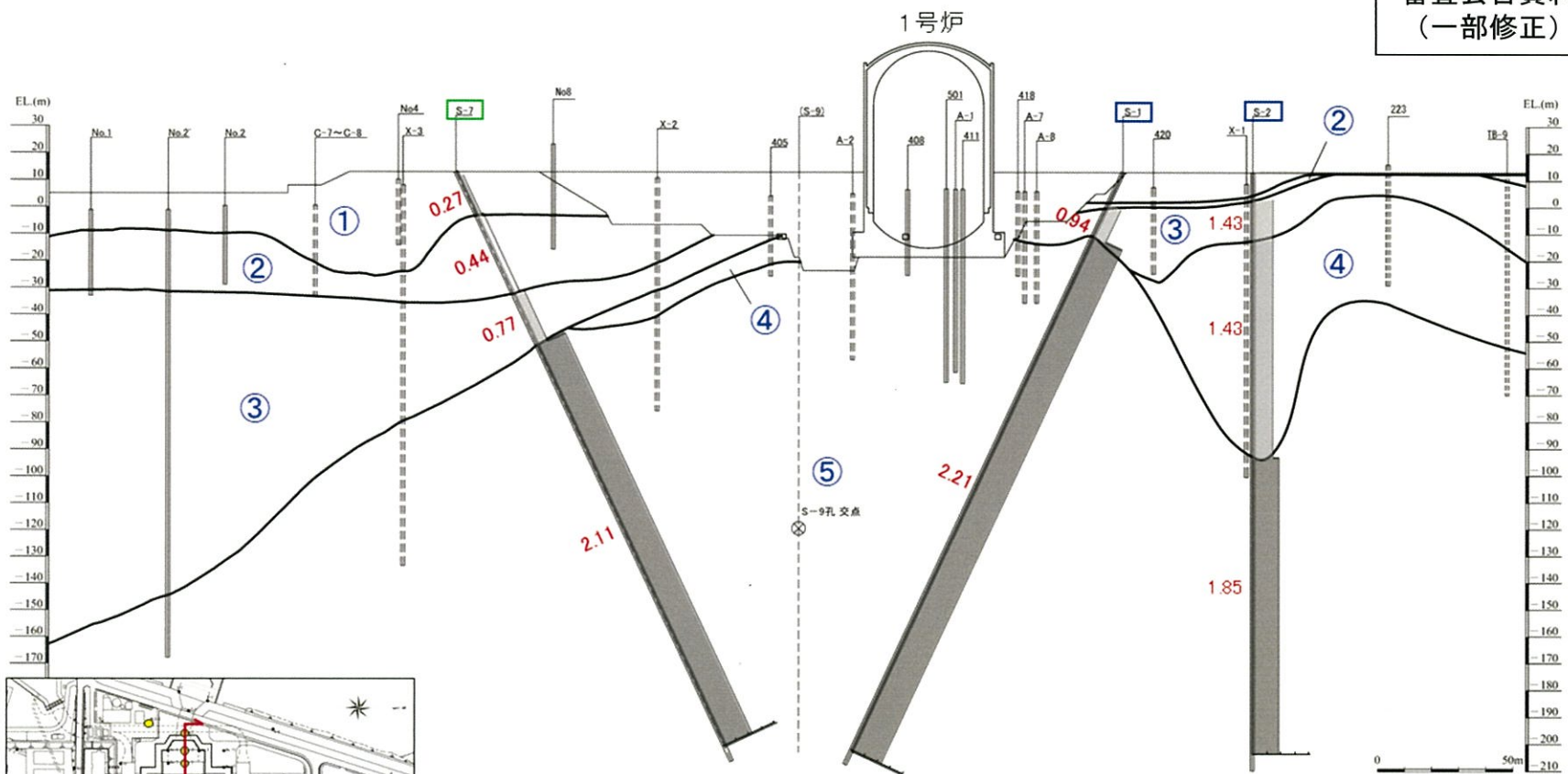
原子炉設置位置付近の速度層断面による設定

- 31～33頁に示す速度層断面より、鉛直アレイ地震計が設置されるEL.-118.5mより浅部と、EL.-118.5mからEL.-200.0mまでの速度層に大きな差異が見られないことから、鉛直アレイ地震観測記録により設定した地盤減衰(Q値)をEL.-200mまで設定。

### 3. 地下構造モデルの設定

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X<sub>1</sub>-X<sub>1</sub>' 断面)

第5回  
審査会合資料  
(一部修正)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)
①	0.28
②	0.52
③	0.90
④	1.37
⑤	2.05

サスペンション法  
 ダウンホール法+サスペンション法  
1.44 速度値Vs(km/s)

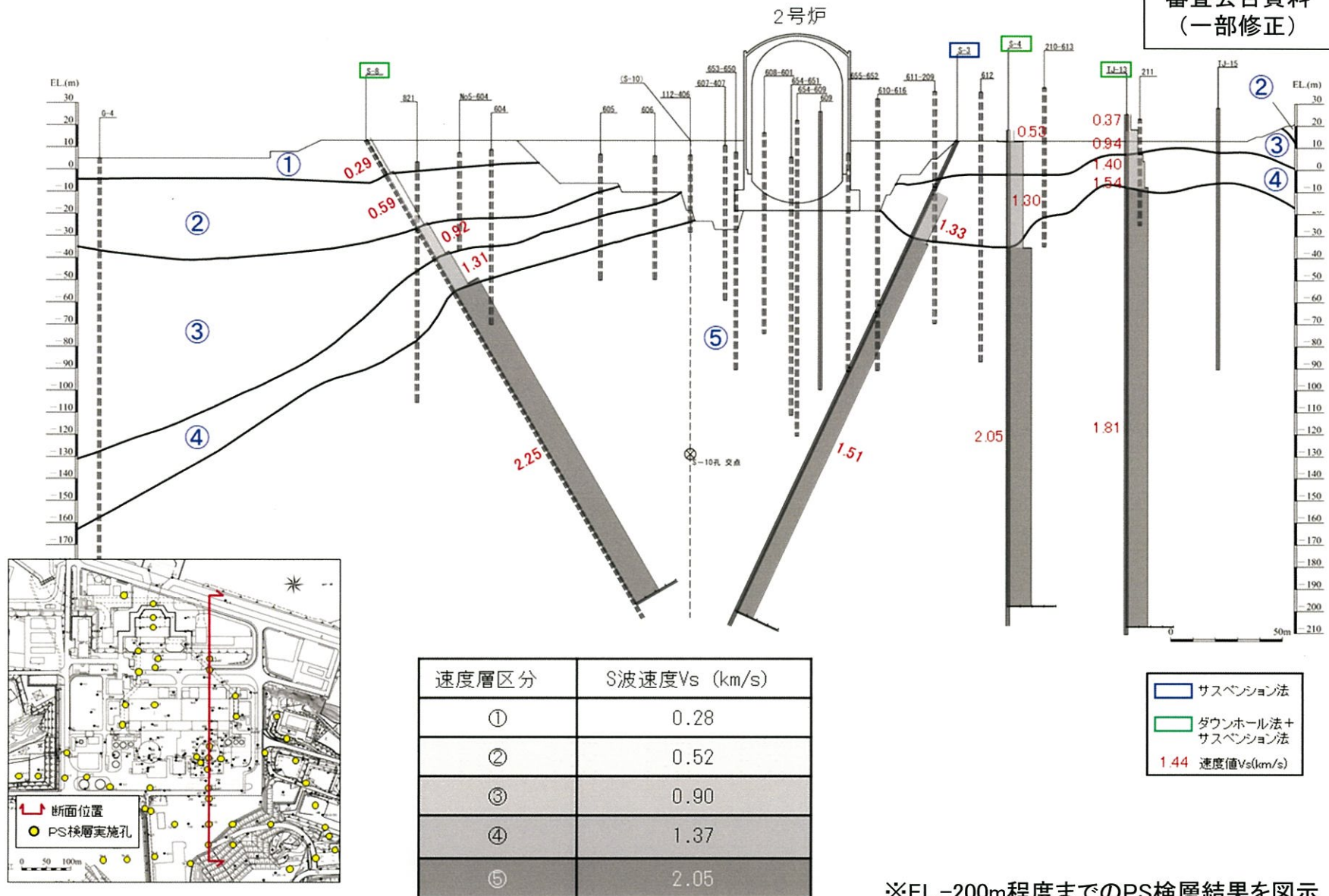
※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示



### 3. 地下構造モデルの設定

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X<sub>2</sub>-X<sub>2</sub>' 断面)

第5回  
審査会合資料  
(一部修正)

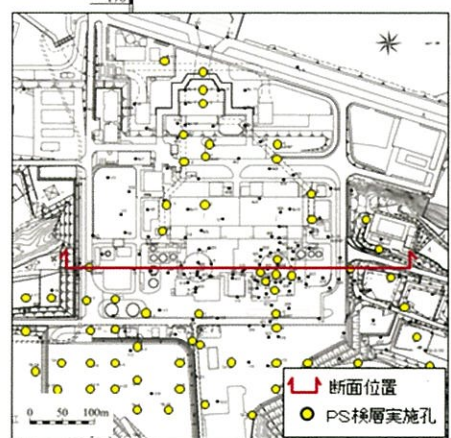
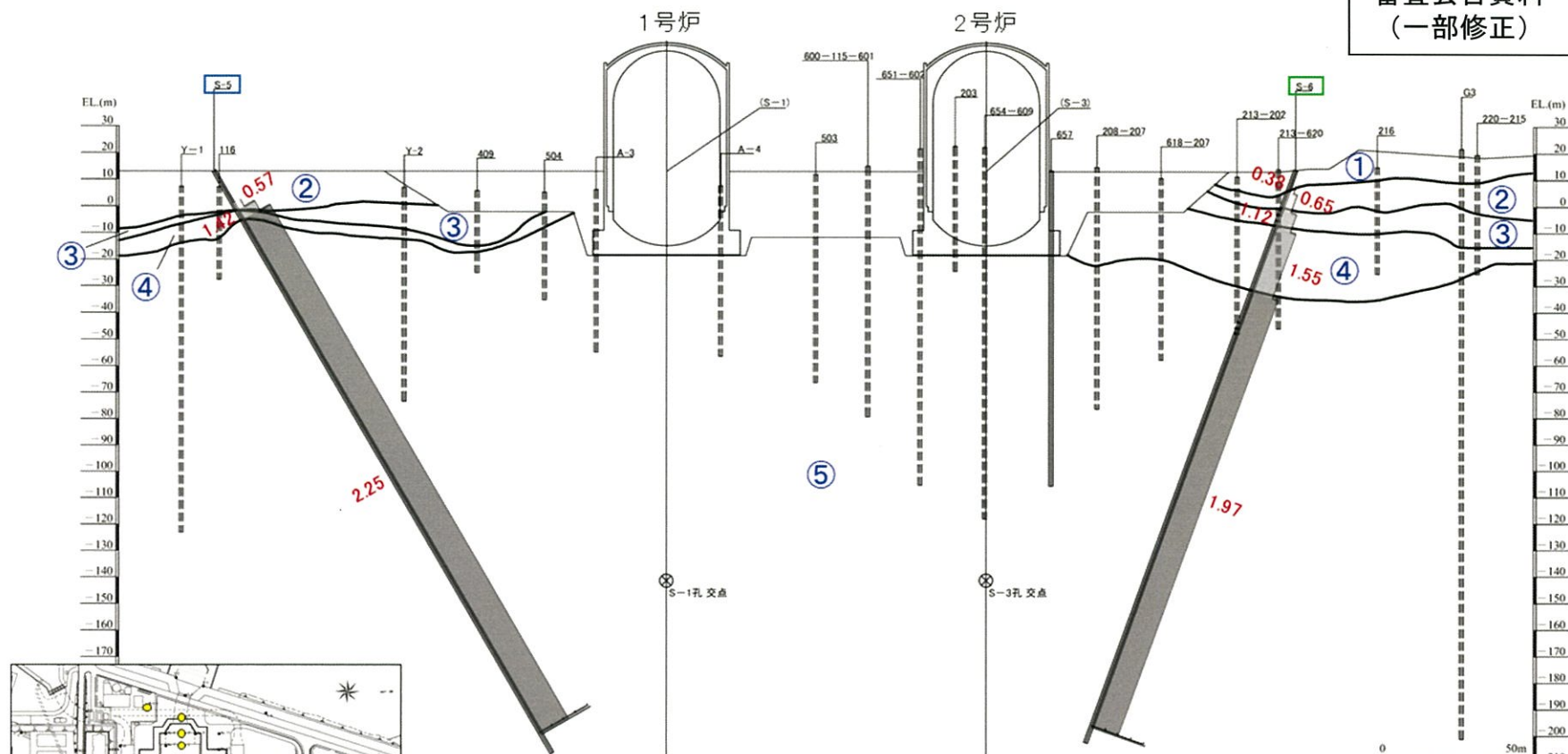


※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

### 3. 地下構造モデルの設定

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (Y-Y' 断面)

第5回  
審査会合資料  
(一部修正)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)
①	0.28
②	0.52
③	0.90
④	1.37
⑤	2.05

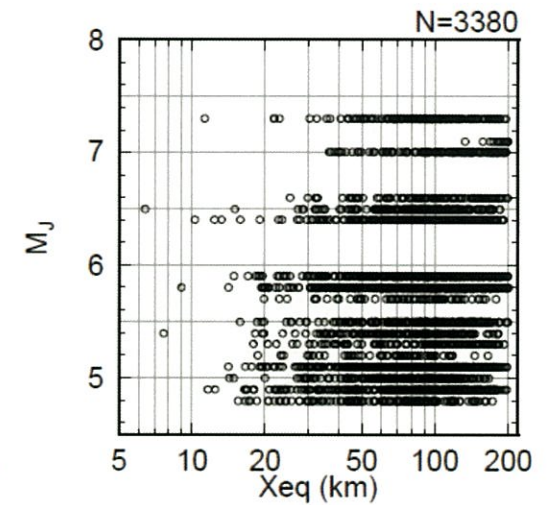
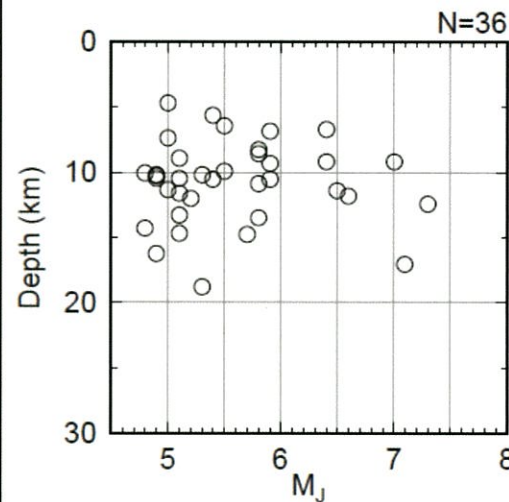
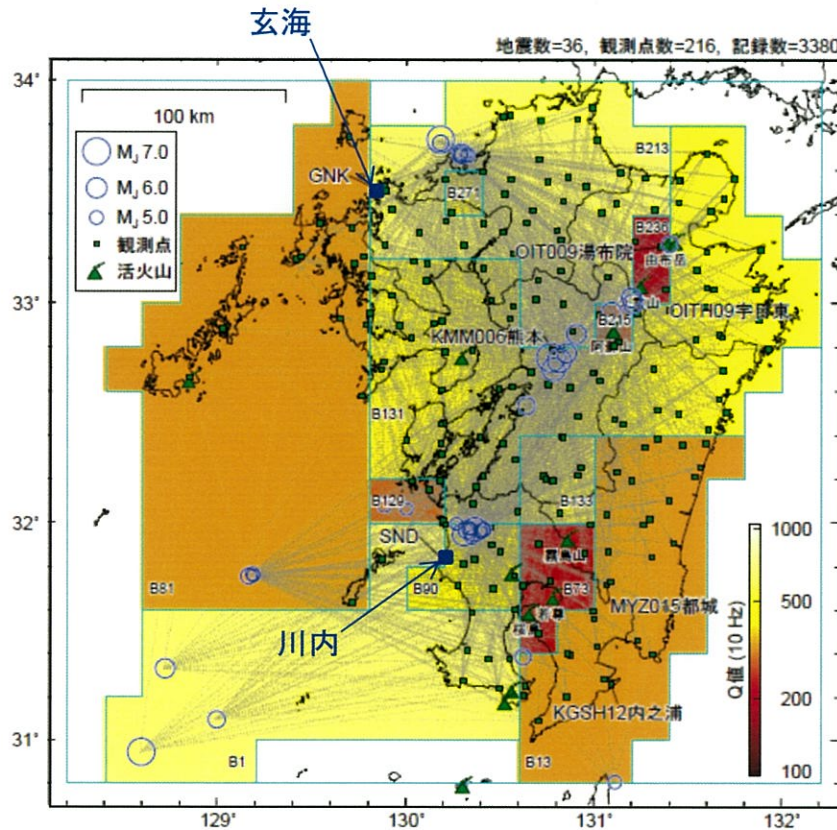
サスペンション法  
 ダウンホール法+サスペンション法  
1.44 速度値Vs(km/s)

※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

### 3. 地下構造モデルの設定

#### 地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

- 友澤ほか(2019)<sup>4),5)</sup>では、九州地域周辺で発生した地震におけるK-NET、KiK-net、川内原子力発電所及び玄海原子力発電所の観測記録を用いて、九州地域の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性をブロックインバージョン解析により推定。
- ブロックインバージョン解析では、伝播経路特性の不均質性を考慮。



友澤ほか(2019)

検討に用いた地震の震央分布及び観測点位置

### 3. 地下構造モデルの設定

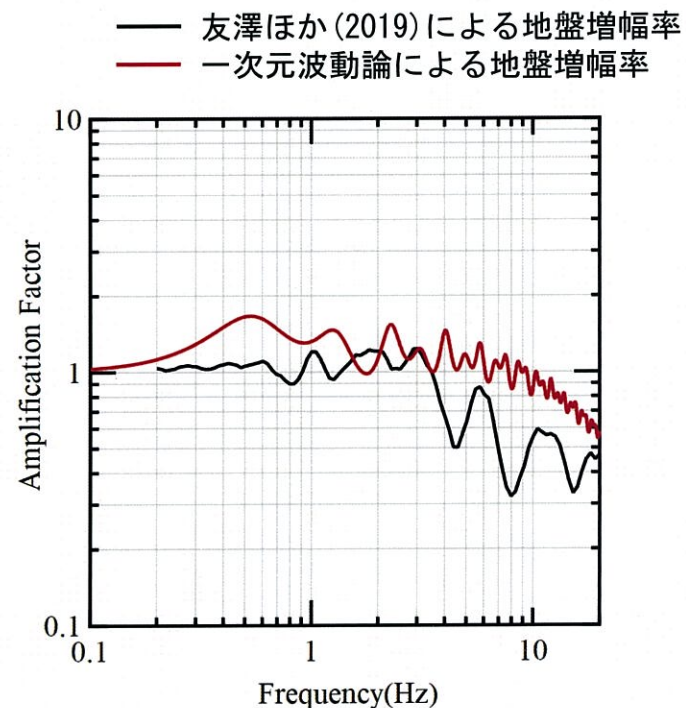
#### 地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

- 友澤ほか(2019)では、地中観測点が地震基盤とみなせるOITH09(宇目東)とKGS12(内之浦)を基準点としており、推定されたサイト増幅特性は $V_s=3000\text{m/s}$ 程度からの地盤増幅率と見なせる。
- 友澤ほか(2019)では、川内原子力発電所のサイト増幅特性が推定されており、前出の地下構造モデルにおける $V_s=3000\text{m/s}$ 相当の層上面から地表まで一次元波動論に基づく算出した地盤増幅率との比較を実施した結果、友澤ほか(2019)による地盤増幅率より大きい傾向。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる  
一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$V_s$ ( $\text{m/s}$ )	Q値
+11.0m	0	2.70	1500	12.5
-18.5m	1	2.70	1500	12.5
-28.5m	2	2.70	1600	12.5
-200m	2'	2.70	1600	100
-480m	3	2.70	2150	200
-1018.5m	4	2.70	3010	200
-2018.5m	5	2.70	3240	300
-3018.5m	6	2.70	3500	300
-17018.5m	7	3.00	3800	500
-33018.5m	8	3.30	4300	500

解放基盤表面(EL. -18.5m)上に0層を追加



### 3. 地下構造モデルの設定

- 以上を踏まえ、既許可の長周期帯の理論的方法に用いる一次元地下構造モデルを基に、EL. -200mから解放基盤表面 (EL. -18.5m) までの地盤減衰を $Q=12.5$ と設定した地下構造モデルを用いて、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値
解放基盤表面 -18.5m	1	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	2	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	2'	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	3	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	4	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	5	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	6	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	7	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	8	-33.0	3.30	4300	7600	500

## 4. 地震基盤相当面の設定

### 「地震基盤相当面」の考え方

#### ○ 許可基準解釈別記2第4条第5項第三号②

「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。）」

#### ○ 検討チーム報告書<sup>6)</sup>

「地震基盤相当面の $V_s$ は、地盤物性補正に用いたNoda et al. (2002)<sup>7)</sup>による経験式における定義を参考に $V_s=2200\text{m/s}$ 以上とした。」


「地盤物性補正に用いたNoda et al. (2002)の地盤増幅率の経験式においては、 $V_s=2200\text{m/s}$ の地盤を「地震基盤相当」と定義し、 $V_s=3000\text{m/s}$ 程度の地震基盤からの地盤増幅率は十分小さく、地震動としては同等とみなすことができると仮定している。なお、加藤ほか(1998)<sup>8)</sup>により、Noda et al. (2002)の地盤増幅率算定の基準となった小玉川観測点 ( $V_s=2200\text{m/s}$ ) といわき観測点・富岡観測点 ( $V_s=2800\text{m/s}$ ) の観測記録を用いた解析が行われ、両者の地盤増幅による地震動の差異が十分に小さいことが確認されている。」

#### ○ 検討チーム報告書 参考資料<sup>9)</sup>

「一般に $V_s=2000\sim 3000\text{m/s}$ 程度での地盤増幅率は十分小さいと仮定し、地震基盤面での地震動レベルと考える。」

#### ○ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-2015<sup>10)</sup>

「せん断波速度 $2.0\sim 2.8\text{km/s}$ の地層は地震動を考える場合の基準となる地盤と考えられる。」

- 
- ・ 「地震基盤相当面」の物理的意味としては「地震基盤」からの地盤増幅率が小さく地震動として地震基盤面と同等と見なせる地盤の解放面と解釈。
  - ・ 「地震基盤相当面」は $V_s=2000\sim 3000\text{m/s}$ 程度の地層と解釈。

## 4. 地震基盤相当面の設定

- 前頁での解釈を踏まえ、川内原子力発電所の地震基盤相当面は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデルにおける $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面 (EL. -480m) に設定。

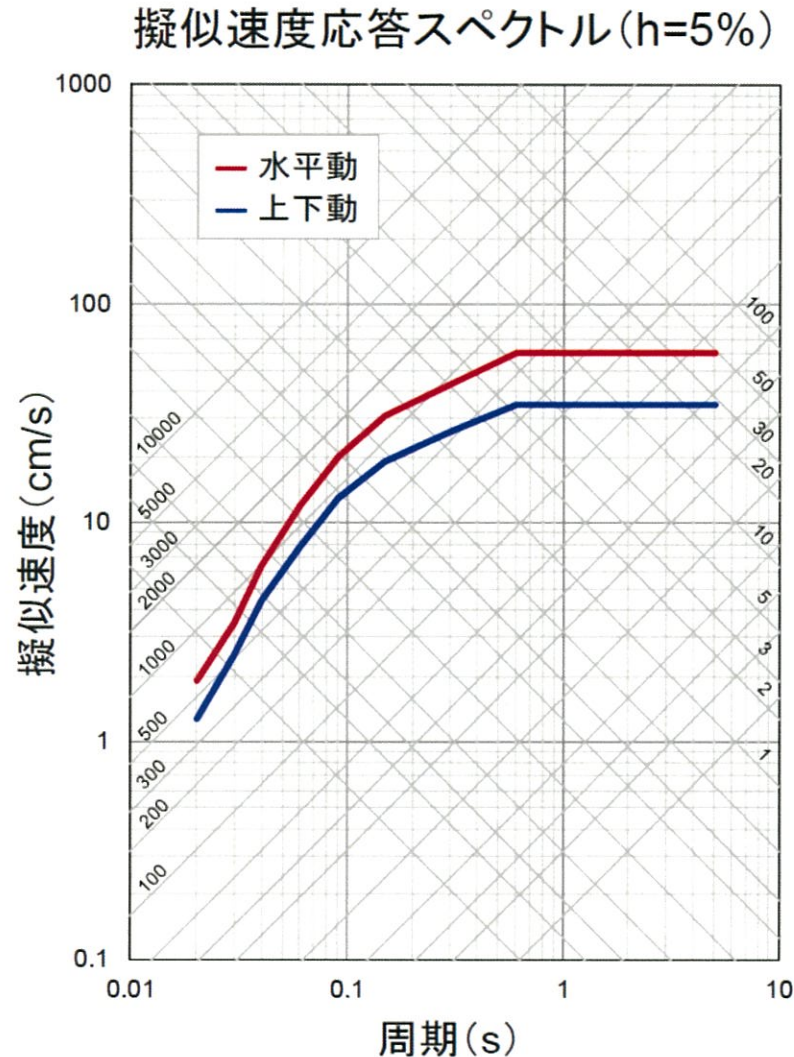
標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Q 値
解放基盤表面						
-18.5m	1	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	2	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	2'	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	3	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	4	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	5	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	6	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	7	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	8	-33.0	3.30	4300	7600	500

▼地震基盤相当面

## 5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

- 地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成。



コントロールポイント

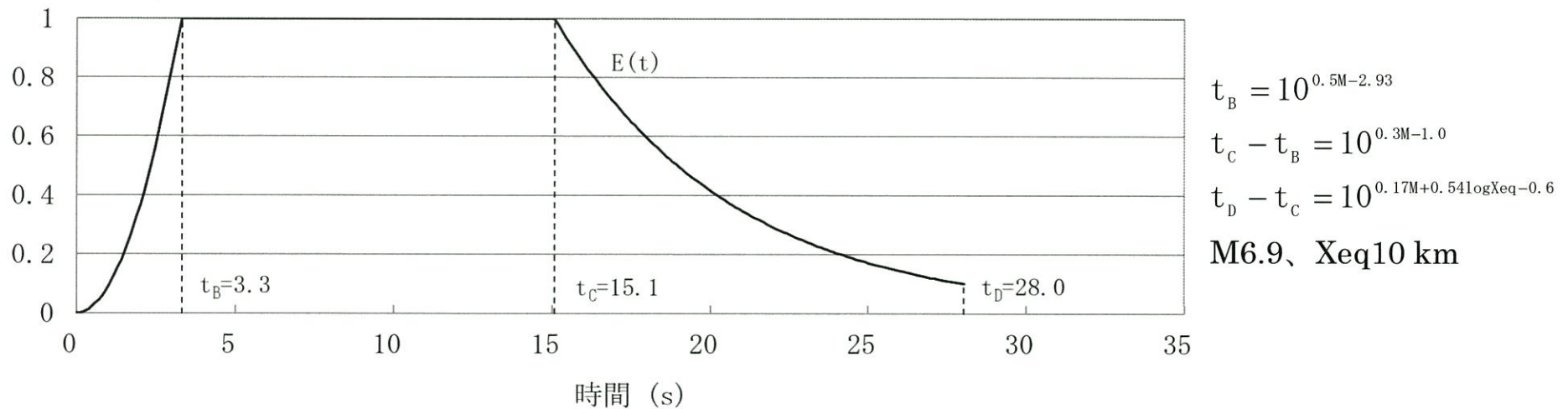
周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

設置許可基準  
規則解釈別記2



## 5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

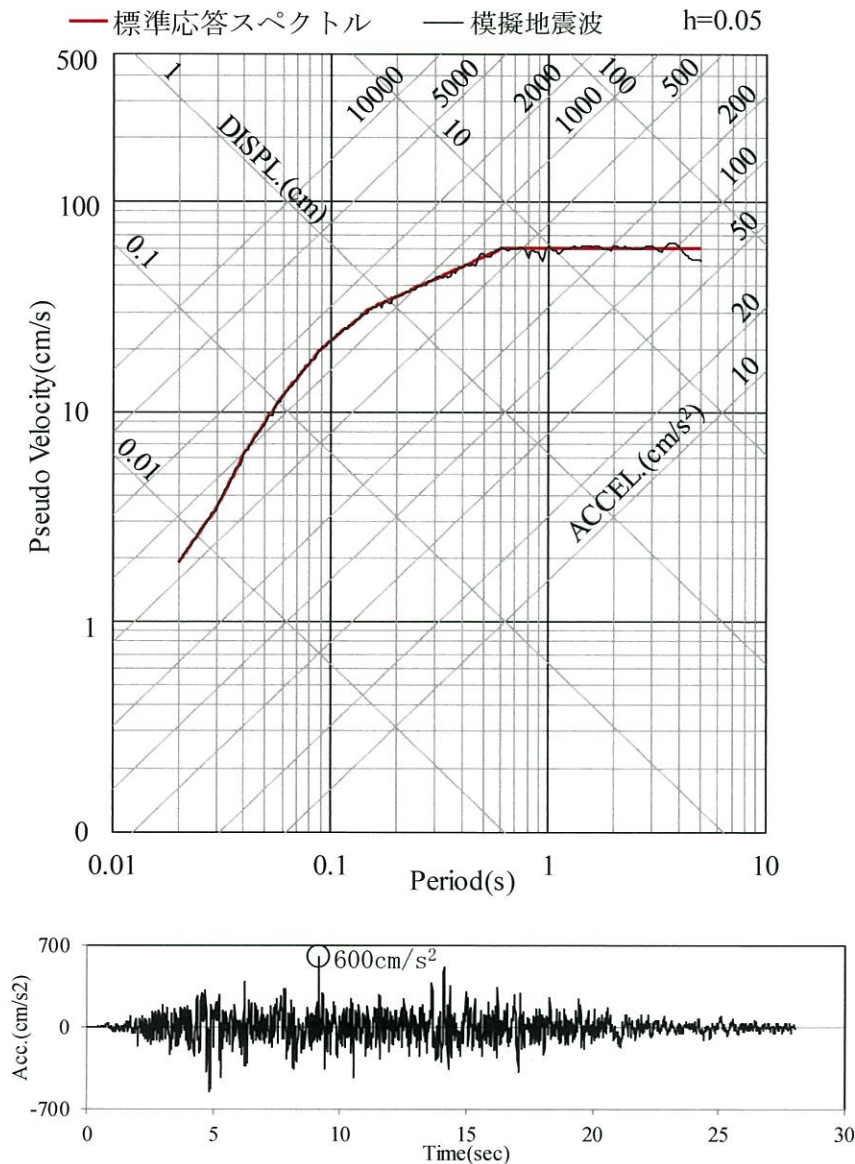
- 模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al. (2002)<sup>7)</sup>による振幅包絡線の経時的变化 (M6.9、Xeq10km) を採用し、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。
- マグニチュードMについては、「全国共通に考慮すべき地震動」は「Mw6.5程度未満」とされていることから、Mw6.5相当のM6.9と設定。
- 等価震源距離Xeqについては、震源近傍を想定し、Xeq10kmと設定。



	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	28.0	3.3	15.1	28.0
鉛直	28.0	3.3	15.1	28.0

# 5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

## 模擬地震波の作成結果(水平方向)



	作成結果
① 応答スペクトル比R(T)	0.87 ≥ 0.85
② SI比	1.00 ≥ 1.0

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

T : 周期 (s)

S<sub>v1</sub>(T) : 模擬地震波の応答スペクトル値

S<sub>v2</sub>(T) : 目標とする応答スペクトル値

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

SI : 応答スペクトル強さ

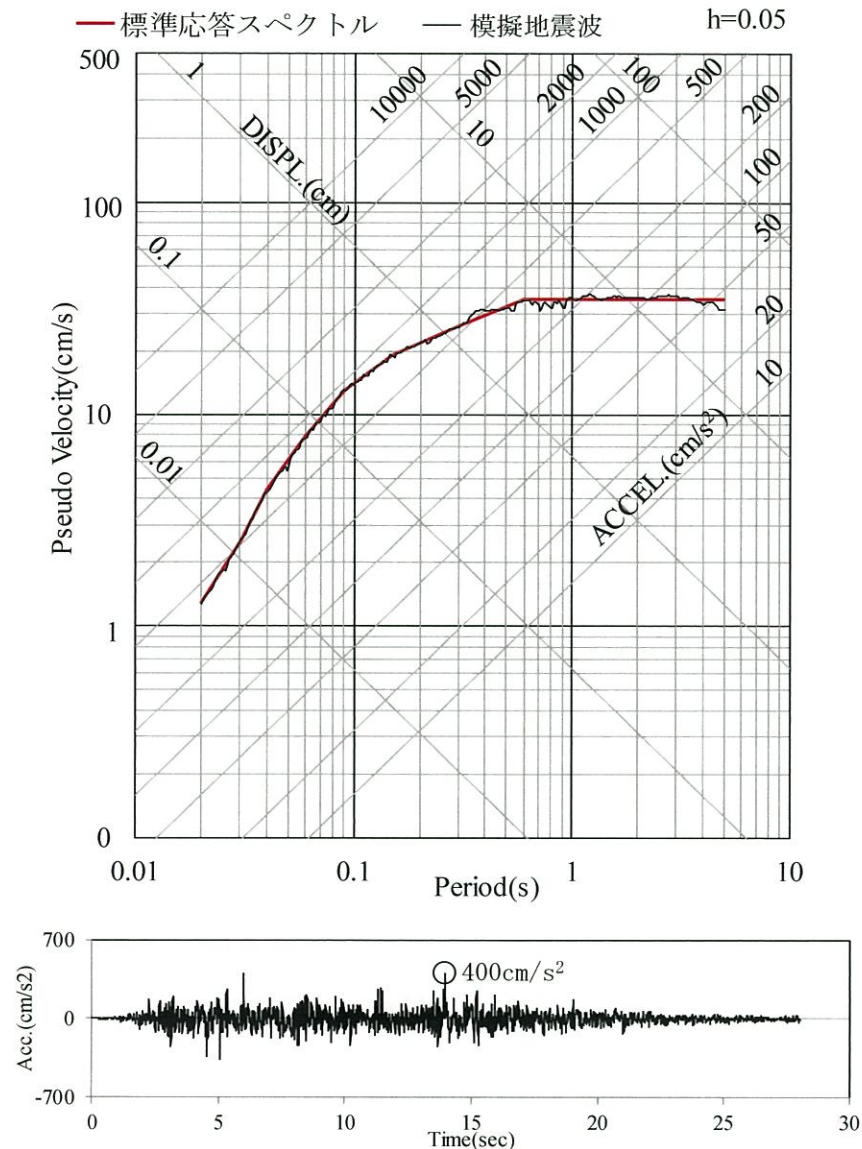
S<sub>v</sub>(T) : 模擬地震波の応答スペクトル(cm/s)

$\bar{S}_v$ (T) : 目標とする応答スペクトル(cm/s)

T : 固有周期(s)

# 5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

## 模擬地震波の作成結果(鉛直方向)



	作成結果
① 応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85
② SI比	1.01 ≥ 1.0

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

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

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

SI : 応答スペクトル強さ

$S_v(T)$  : 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_v(T)$  : 目標とする応答スペクトル (cm/s)

T : 固有周期 (s)

## 6. 解放基盤表面における地震動の設定

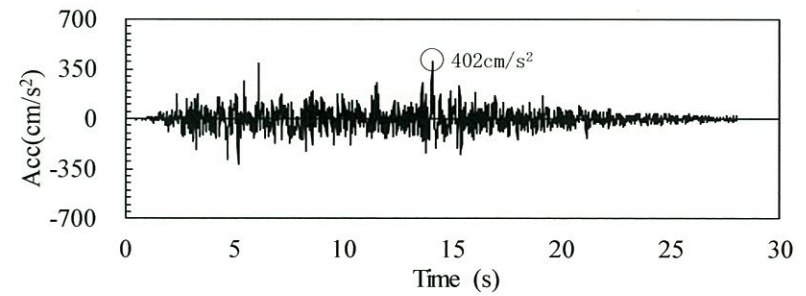
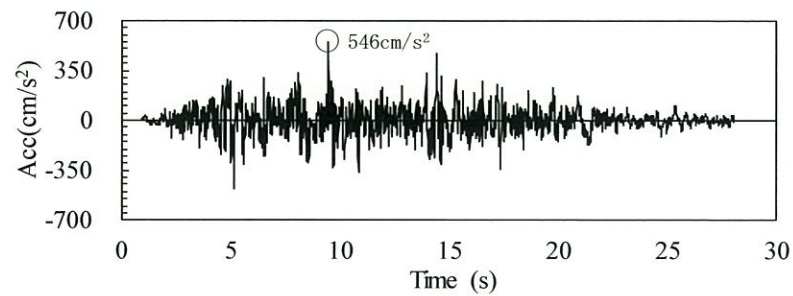
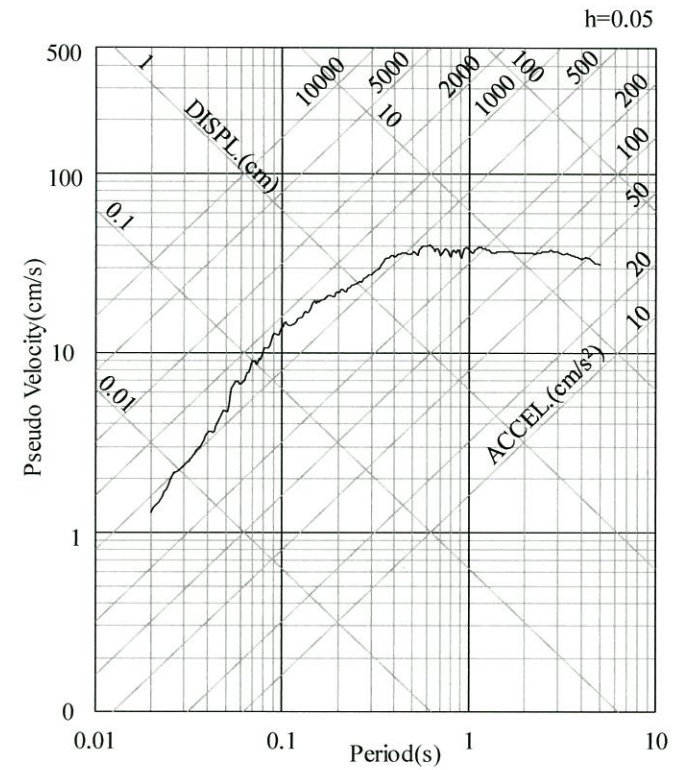
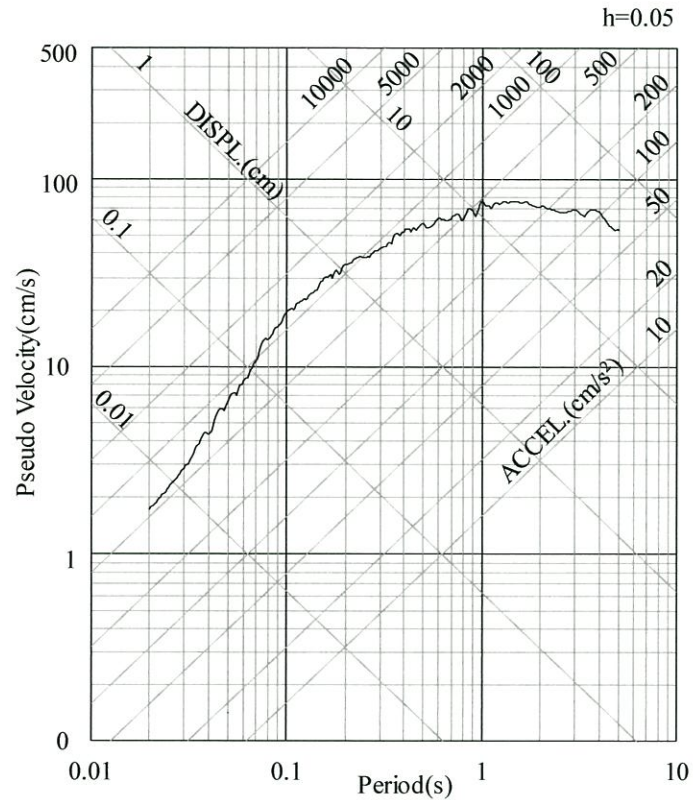
- 地震基盤相当面における模擬地震波を用いて、一次元波動論により、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面から解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Q 値
解放基盤表面						
-18.5m	1	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	2	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	2'	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	3	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	4	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	5	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	6	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	7	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	8	-33.0	3.30	4300	7600	500

↑ 一次元波動論による地震波の伝播特性の反映

## 6. 解放基盤表面における地震動の設定

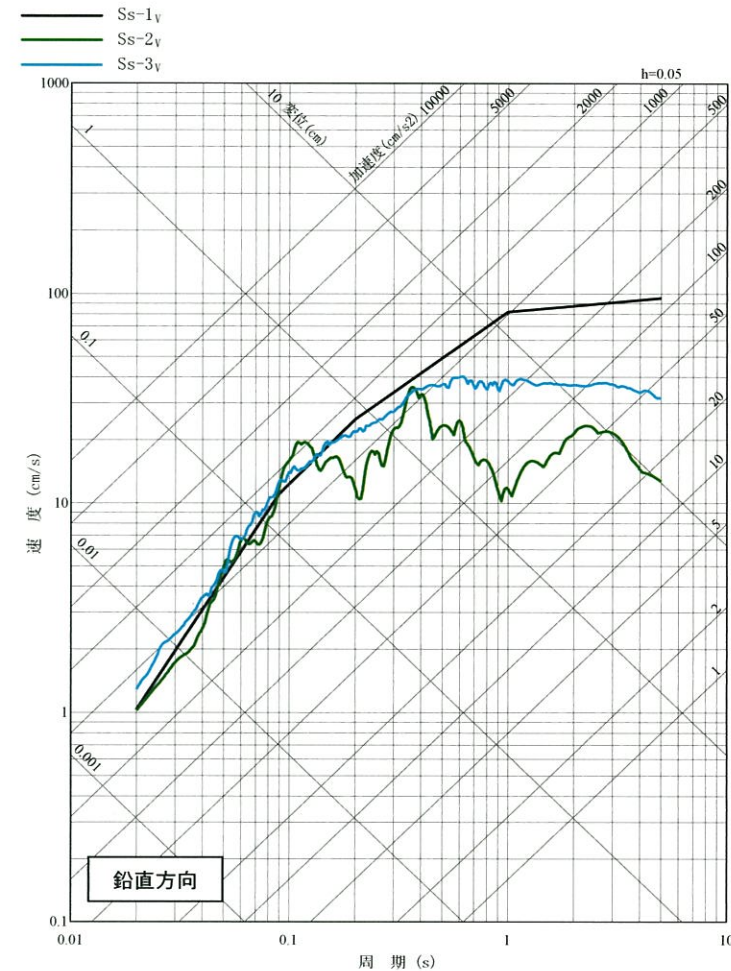
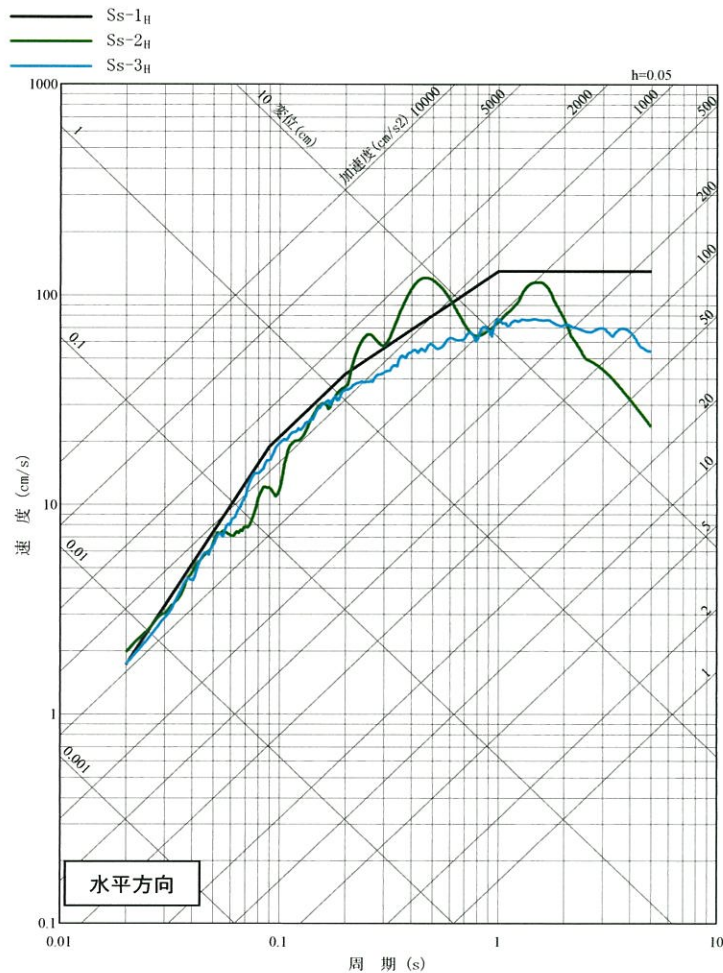


水平方向

鉛直方向

## 7. 基準地震動の策定

- 現行の基準地震動（平成26年9月10日許可）の応答スペクトルと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を比較した結果、標準応答スペクトルを考慮した地震動が、鉛直方向の一部の周期帯で現行の基準地震動を上回ることから基準地震動Ss-3として追加。



基準地震動の応答スペクトル

## 7. 基準地震動の策定

### 基準地震動の最大加速度

(単位：cm/s<sup>2</sup>)

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540	324
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
全国共通で考慮すべき地震動(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	546	402

(単位：cm/s<sup>2</sup>)

免震構造施設設計用基準地震動		Ss	水平方向	鉛直方向
応答スペクトルに基づく手法		Ss-L	400	240

## 【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 38頁に示す通り、川内原子力発電所の地震基盤相当面は、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデルにおける $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面(EL. -480m)に設定。
- ただし、上記設定における $V_s=2150\text{m/s}$ は、設置許可基準規則解釈別記2に示される $V_s=2200\text{m/s}$ 以上を下回るため、次頁以降で、仮想的に、 $V_s=2200\text{m/s}$ の層を設定し、解放基盤表面までの地盤増幅率の検討を実施。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Q値
解放基盤表面						
-18.5m	1	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	2	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	2'	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	3	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	4	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	5	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	6	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	7	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	8	-33.0	3.30	4300	7600	500

▼地震基盤相当面



# 【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

○ Vs=2150m/sの層は、7頁に示すとおり、微動アレイの速度構造を基に設定。

第114回  
審査会合資料

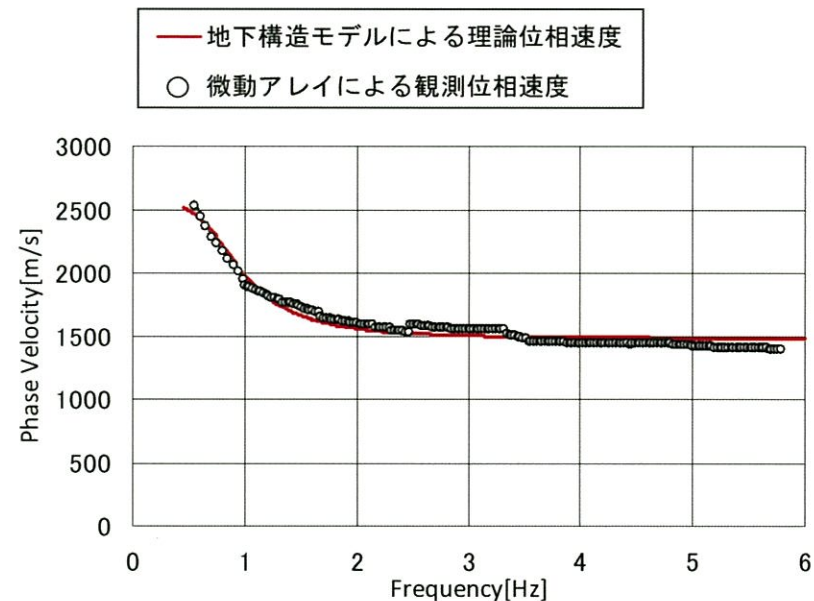
## 再設定した地下構造モデルと観測分散曲線の比較

■ 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 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	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1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 既許可の地下構造モデルにおける $V_s=2150\text{m/s}$ の層(第3層)を2分割し、新たに地震基盤相当面に対応する層(第3'層: $V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4400\text{m/s}$ )を設け、この層の上面の深度を変数とした再同定を実施。

	既許可地下構造モデル			
	層	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$V_s$ ( $\text{m/s}$ )	$V_p$ ( $\text{m/s}$ )
EL. 11.0m	0	2.70	1500	3200
-18.5m	1	2.70	1500	3200
-28.5m	2	2.70	1600	3700
-480m	3	2.70	2150	4400
-1018.5m	4	2.70	3010	5200



	再同定に用いるモデル			
	層	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$V_s$ ( $\text{m/s}$ )	$V_p$ ( $\text{m/s}$ )
EL. 11.0m	0	2.70	1500	3200
-18.5m	1	2.70	1500	3200
-28.5m	2	2.70	1600	3700
-480m	3	2.70	2150	4400
-●m	3'	2.70	2200	4400
-1018.5m	4	2.70	3010	5200

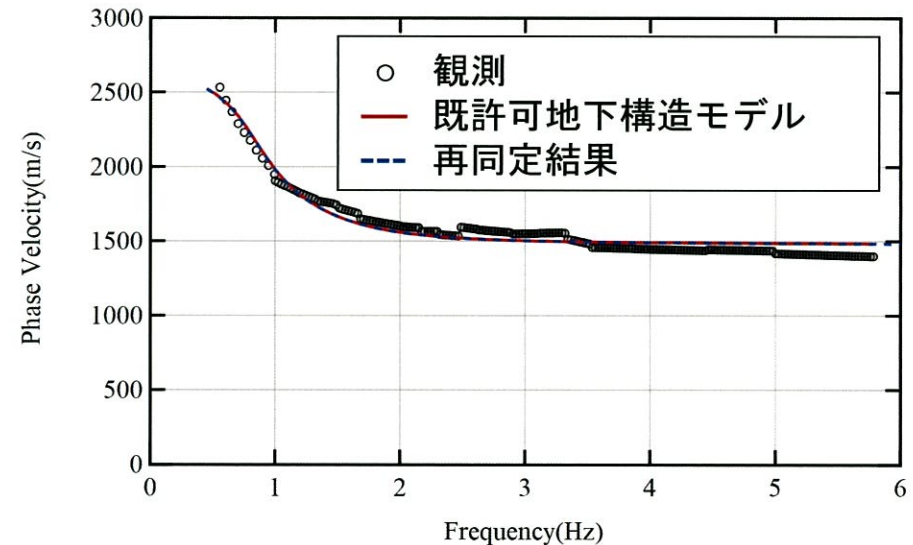
解放基盤表面(EL. -18.5m)上に0層を追加

## 【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 仮想的に、新たに地震基盤相当面に対応する層(第3'層:  $V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4400\text{m/s}$ )を設定し、微動アレイ観測結果に基づく再同定を実施した結果、第3'層の上面の深度はEL.  $-999.5\text{m}$ となった。

	再同定結果			
	層	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$V_s$ ( $\text{m/s}$ )	$V_p$ ( $\text{m/s}$ )
EL. 11.0m	0	2.70	1500	3200
-18.5m	1	2.70	1500	3200
-28.5m	2	2.70	1600	3700
-480m	3	2.70	2150	4400
<b>-999.5m</b>	<b>3'</b>	2.70	2200	4400
-1018.5m	4	2.70	3010	5200

解放基盤表面 (EL.  $-18.5\text{m}$ ) 上に0層を追加



理論位相速度と観測位相速度の比較

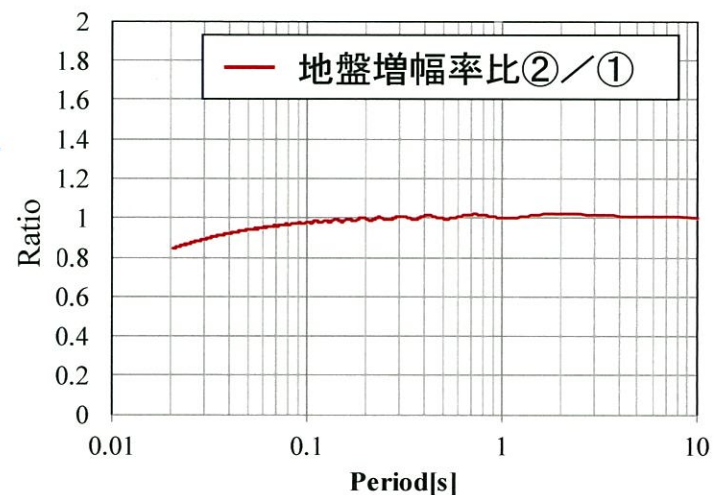
## 【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 前頁の検討結果を、36頁に示す標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデルに反映した仮想的な地下構造モデルを設定。
- 今回の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の  $V_s=2150\text{m/s}$  の層上面から解放基盤表面までの地盤増幅率 (①) と仮想的な地下構造モデルの  $V_s=2200\text{m/s}$  の層上面から解放基盤表面までの地盤増幅率 (②) を比較した結果、短周期側では、仮想的な地下構造モデルの地盤増幅率 (②) のほうが小さい傾向。
- これを踏まえ、38頁に示すとおり、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における  $V_s=2150\text{m/s}$  の層上面に地震基盤相当面を設定。

比較に用いる地下構造モデル

EL. (m)	層	密度 $\rho$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Q値
-18.5m	1	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	2	2.70	1600	3700	12.5
-200m	2'	2.70	1600	3700	100
-480m	3	2.70	2150	4400	200
-999.5m	3'	2.70	2200	4400	200
-1018.5m	4	2.70	3010	5200	200

↑ 地盤増幅率①  
↑ 地盤増幅率②



地盤増幅率の比較

## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 改正された「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（令和3年4月21日原子力規制委員会決定）（以下、「審査ガイド」とする。）における模擬地震波の作成に関する主な改正点は以下のとおり。

### 5.2 基準地震動の策定

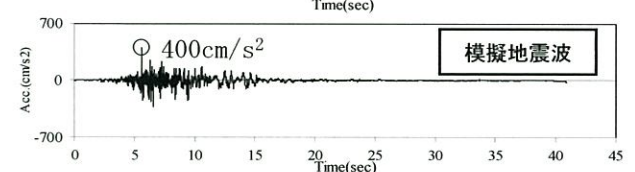
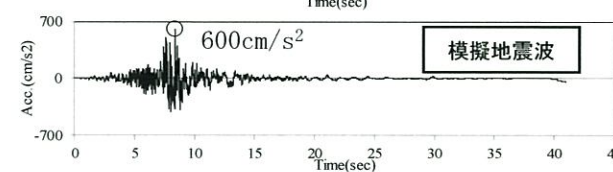
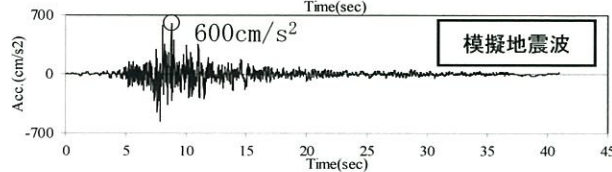
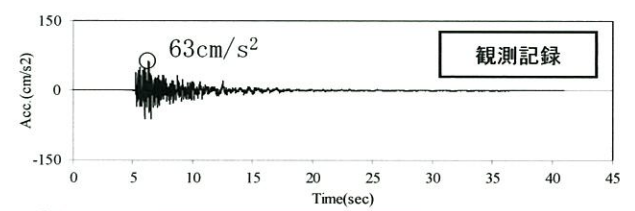
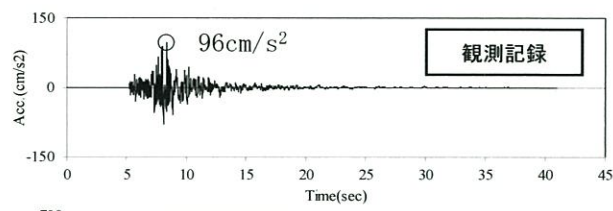
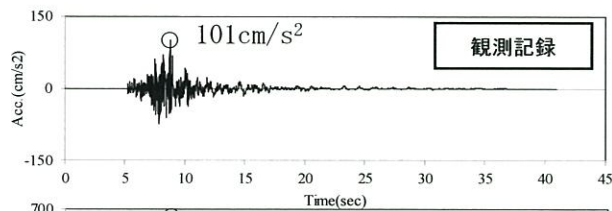
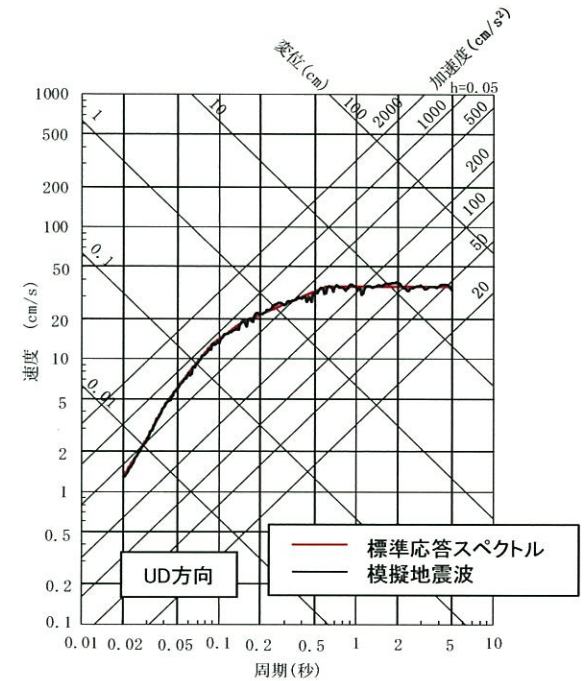
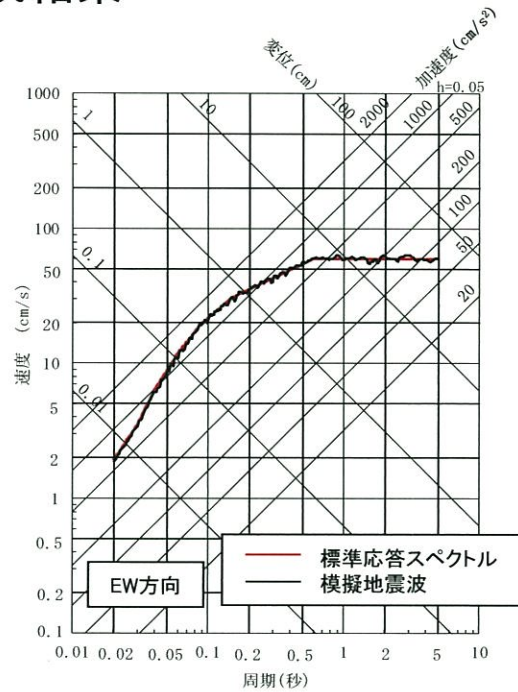
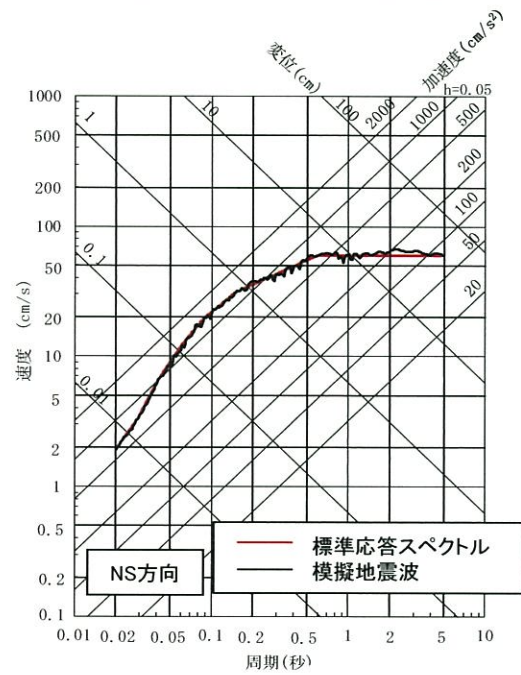
- (1) (略)
- (2) (略)
- (3) 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトル（地震動レベル）に対して、地震動の継続時間及び経時的変化等の特性が適切に考慮されていることを確認する。また、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震動を作成する場合には、複数の方法（例えば、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、実観測記録の位相を用いる方法等）により検討が行われているを確認する。

- 「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」（第8回会合）では、A：正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、B：実観測記録の位相を用いる方法、C：断層破壊過程を考慮した群遅延時間を与える方法が例示。
- 「標準応答スペクトル」を考慮した模擬地震波は、39～42頁に示すとおり、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法により作成しているが、次頁以降でそれ以外の方法による模擬地震波を作成し、検討を実施。



# 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

## 方法Bに基づく模擬地震波の作成結果



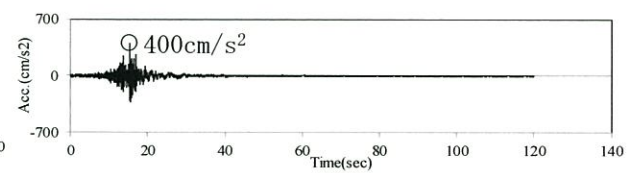
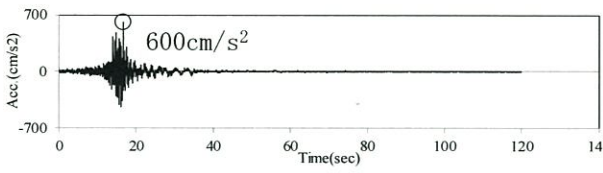
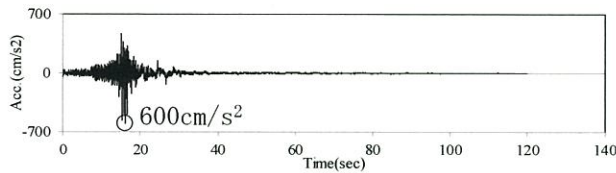
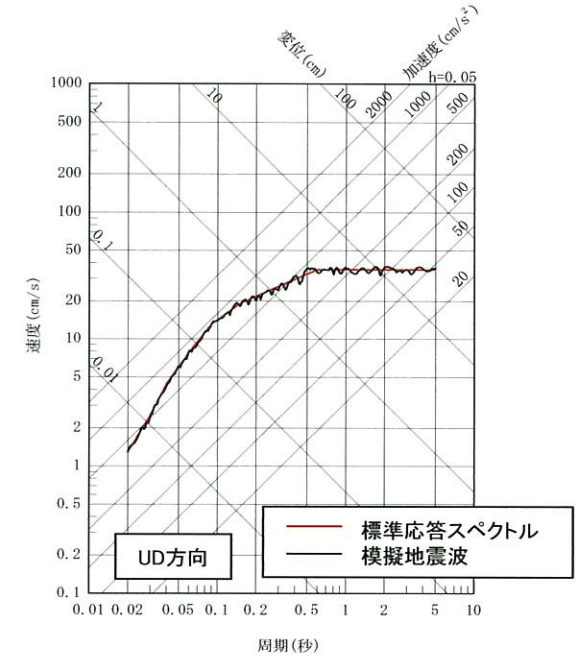
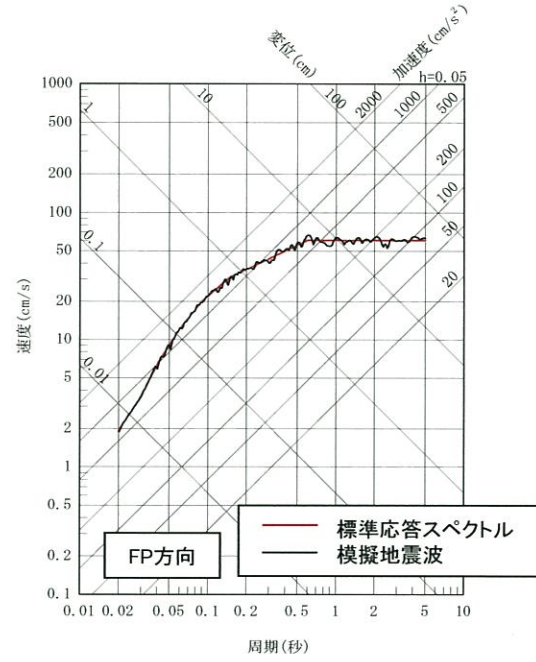
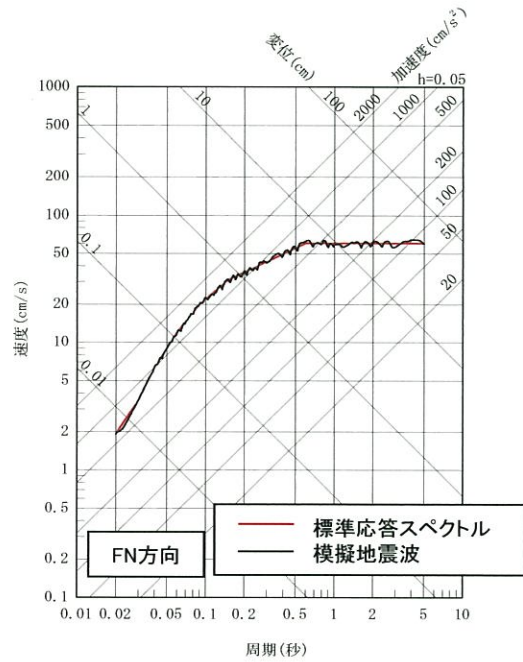
作成結果	
①R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI	1.03 ≥ 1.0

作成結果	
①R(T)	0.91 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

作成結果	
①R(T)	0.86 ≥ 0.85
②SI	1.01 ≥ 1.0

# 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

## 方法Cに基づく模擬地震波の作成結果



	作成結果
①R(T)	0.91 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

	作成結果
①R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

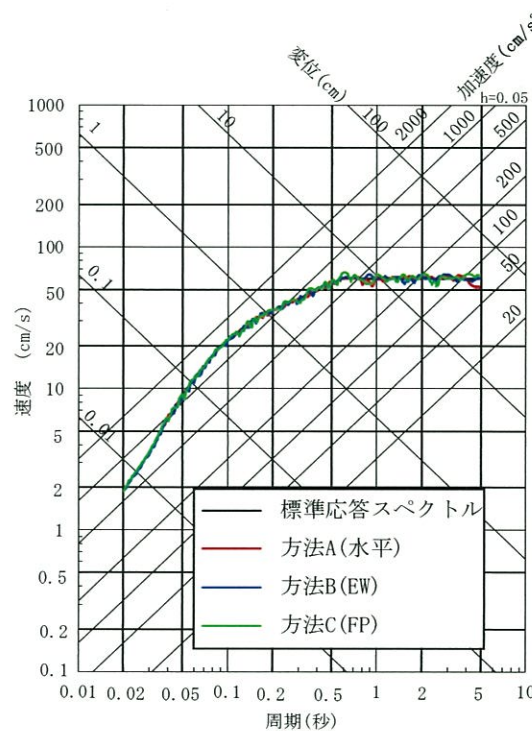
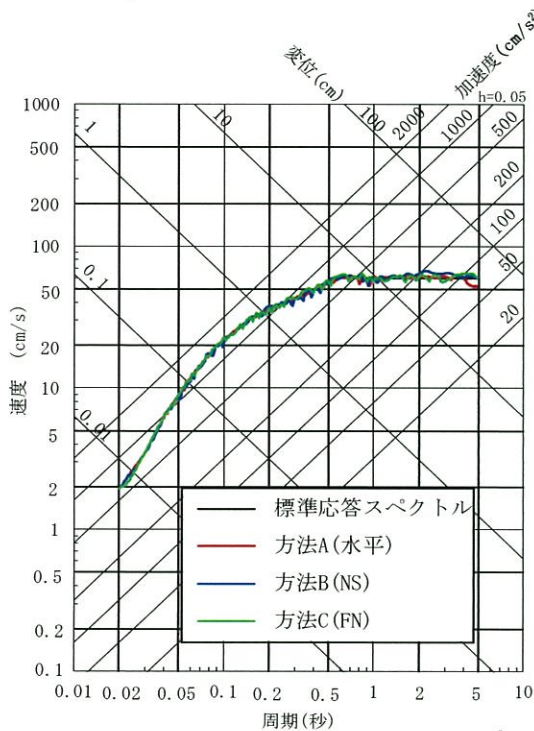
	作成結果
①R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI	1.01 ≥ 1.0



## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

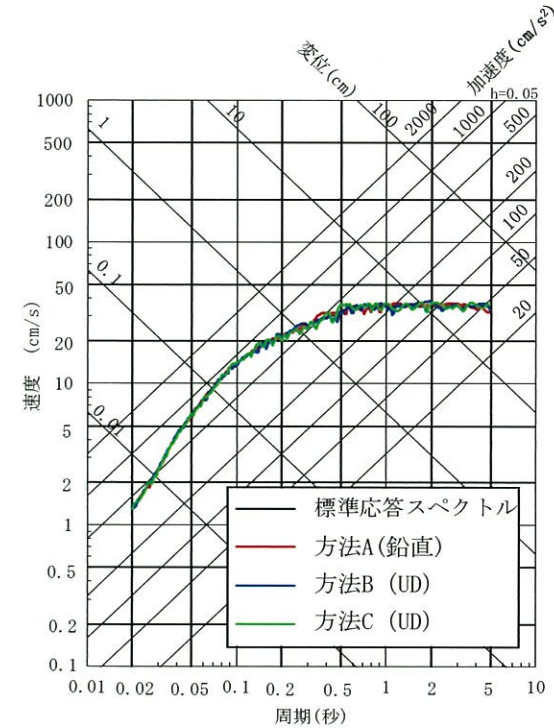
### 方法A～Cに基づく模擬地震波の比較・検討

- 方法A～Cに基づく模擬地震波は、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、応答スペクトルでは大きな差異は見られない。
- 応答スペクトル以外の以下に示す指標を用いて、構造物への影響の観点から比較・検討を実施。
  - ① 累積絶対速度 (CAV値)
  - ② 地震入力エネルギー Spektrum
  - ③ 弾塑性応答 Spektrum



水平方向

方法A～Cに基づく模擬地震波の応答スペクトル



鉛直方向

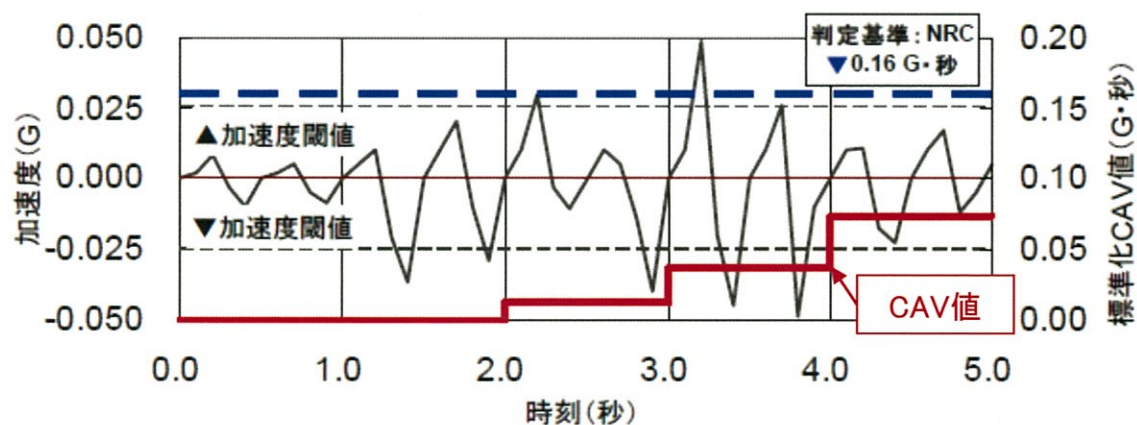
## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

### ① 累積絶対速度 (CAV値)

- CAV値は、米国EPRI(電力中央研究所)が、地震の揺れの強さを計る指標の一つとして、設備の損傷にはほとんど影響しないと考えられるパルス的な加速度振幅による不要な炉停止を回避する目的で開発。
- 米国では岩盤露頭の観測記録を地震後に確認し、プラントの地震後停止を判断する補助指標として運用されており、立地地域の地震動特性を分析し、CAV値とプラント設備の損傷との関係を求め、敷地の適切な加速度閾値と炉停止判定基準を設けている。
- CAV値(標準化CAV値)自体は、加速度時刻歴の時々刻々の変化を1秒区間毎に確認し、その区間内の最大値がある閾値(NRC:0.025G≒24.5Gal)を超過した場合にそのCAVi値(=[1秒区間内の加速度振幅の絶対値×時間刻み])の和、単位:G・秒)を累積していくもの。

$$CAV = CAV_i + \int_i^{i+1} ABS[a(t)]dt$$

- 米国NRCによれば、この標準化CAV値が0.16G・秒を超過するとプラント停止の判断手順に入ることとなっている。



水谷ほか(2008)<sup>13)</sup>  
(一部加筆)

標準化CAV値の概念模式図

- 本検討では、閾値を300Galとし、検討を実施。

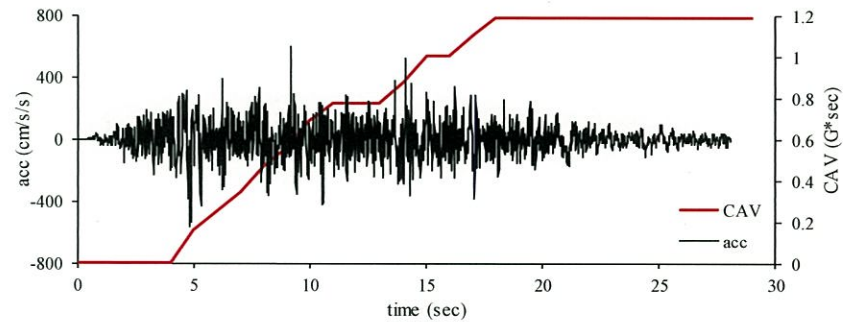
## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

○ 前頁に基づき算出したCAV値は、方法Aが方法B及び方法Cより大きい。

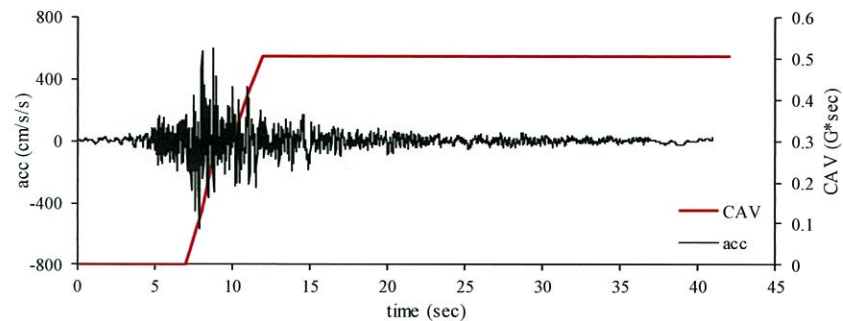
方法A～Cに基づく模擬地震波の  
CAV値算出結果

模擬地震波		CAV値[G・秒]
方法A	水平動	1.19
方法B	NS方向	0.51
	EW方向	0.31
方法C	FN方向	0.30
	FP方向	0.39

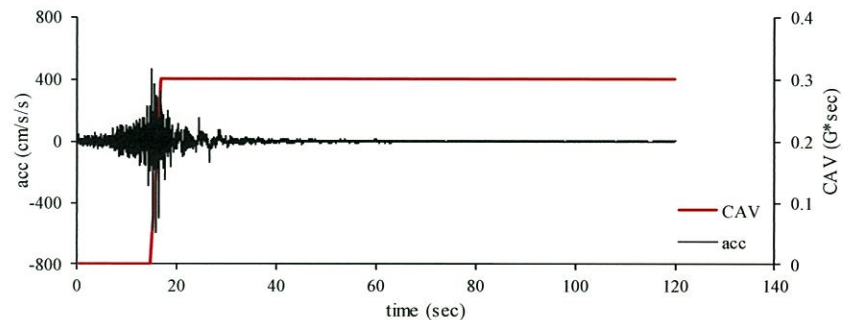
【方法A】(水平動)



【方法B】(NS方向)



【方法C】(FN方向)



方法A～Cに基づく模擬地震波のCAV値算出結果の例

## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

### ② 地震入力エネルギースペクトル

○ 地震入力エネルギースペクトルは、地震動の全継続時間において構造物に入力される総エネルギー量を等価速度 $V_E$ に換算し、構造物の固有周期との関係を表現したもの。

運動方程式  $M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = -M\ddot{x}_0$

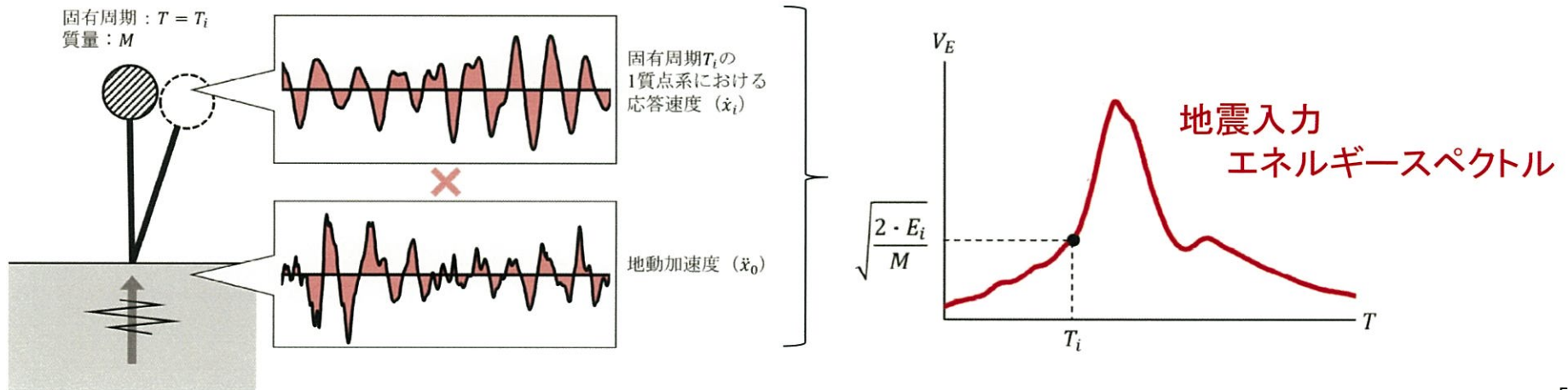
↓ 運動方程式の両辺に  $\dot{x}dt (= dx)$  を乗じて、  
全継続時間 $t_n$ で時間積分

エネルギー方程式  $\int_0^{t_n} M\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^{t_n} C\dot{x}^2dt + \int_0^{t_n} kx\dot{x}dt = -\int_0^{t_n} M\ddot{x}_0\dot{x}dt$

$M$ : 質点の質量  
 $x$ : 質点の相対変位  
 $C$ : 減衰係数  
 $k$ : 質点系の復元力  
 $\ddot{x}_0$ : 地動の加速度

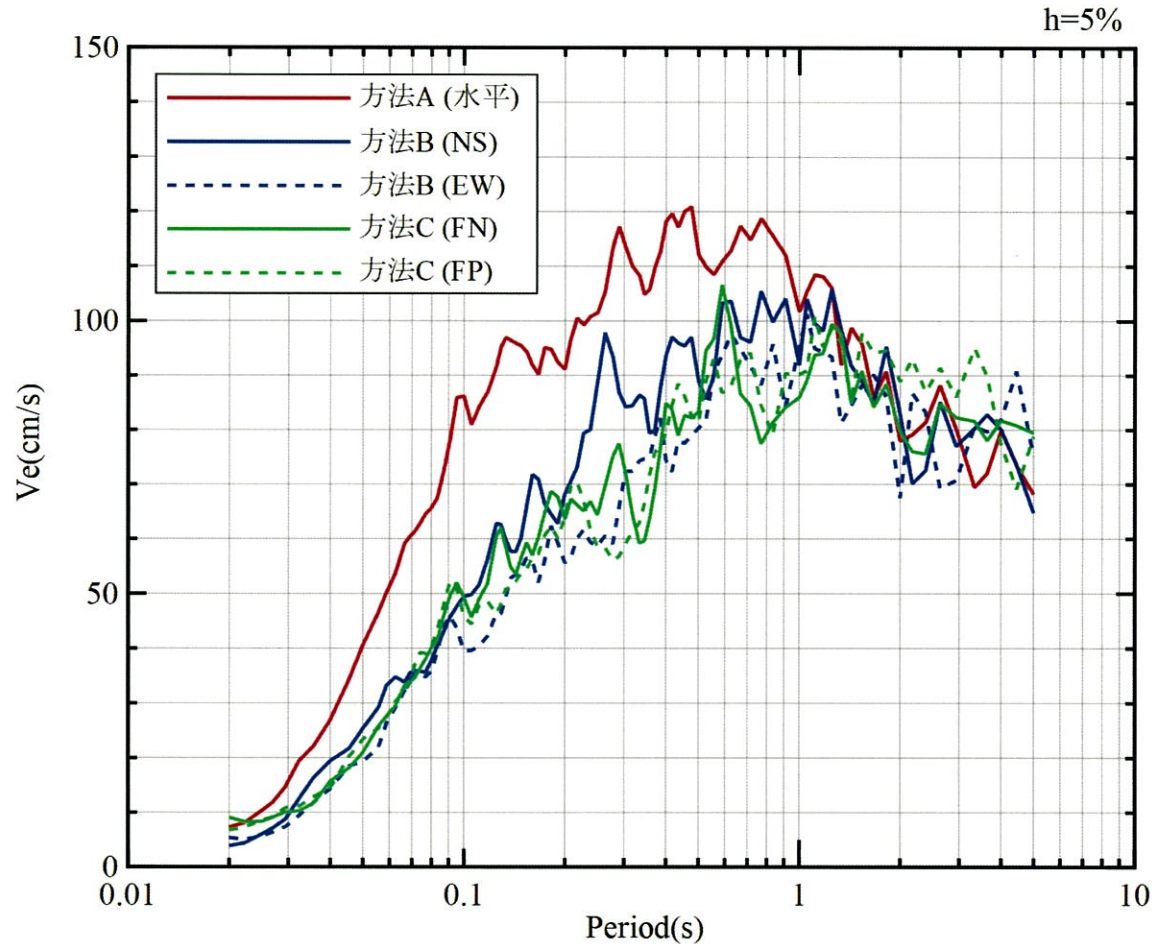
運動エネルギー - 減衰エネルギー - 歪エネルギー - 地震入力エネルギー

地震入力エネルギー  $E = -\int_0^{t_n} M\ddot{x}_0\dot{x}dt = \frac{1}{2}MV_E^2$



## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 前頁に基づき算出した地震入力エネルギースペクトルは、短周期側（1秒程度以下）において、方法Aが方法B及び方法Cより大きい。

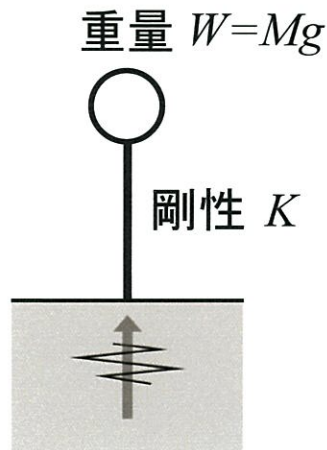


方法A～Cに基づく模擬地震波の入力エネルギースペクトル

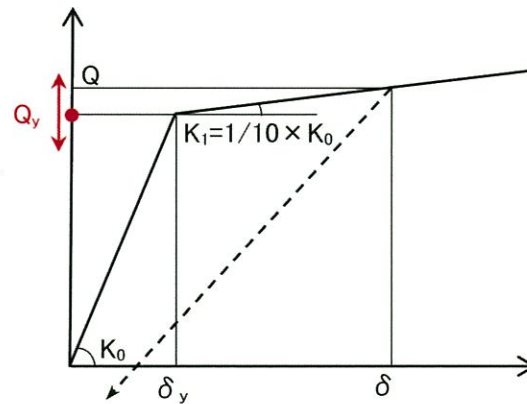
## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

### ③ 弾塑性応答スペクトル

- 弾塑性1質点系モデルを用い、塑性率 $\mu$ が所定の値( $\mu=1\sim 4$ )になるように、降伏せん断力 $Q_y$ を算出。
- 算出した降伏せん断力 $Q_y$ を重量 $W$ で除して降伏せん断力係数 $C$ を算出。
- これを周期 $T$ ごとに繰り返し、周期 $T$ と降伏せん断力係数 $C$ の関係を示したものが弾塑性応答スペクトル。



弾塑性1質点系モデル



バイリニア型(最大点指向型)

固有周期

$$T=2\pi \sqrt{\frac{W}{Kg}}$$

降伏せん断力係数

$$C=\frac{Q_y}{W}$$

塑性率

$$\mu=\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$$

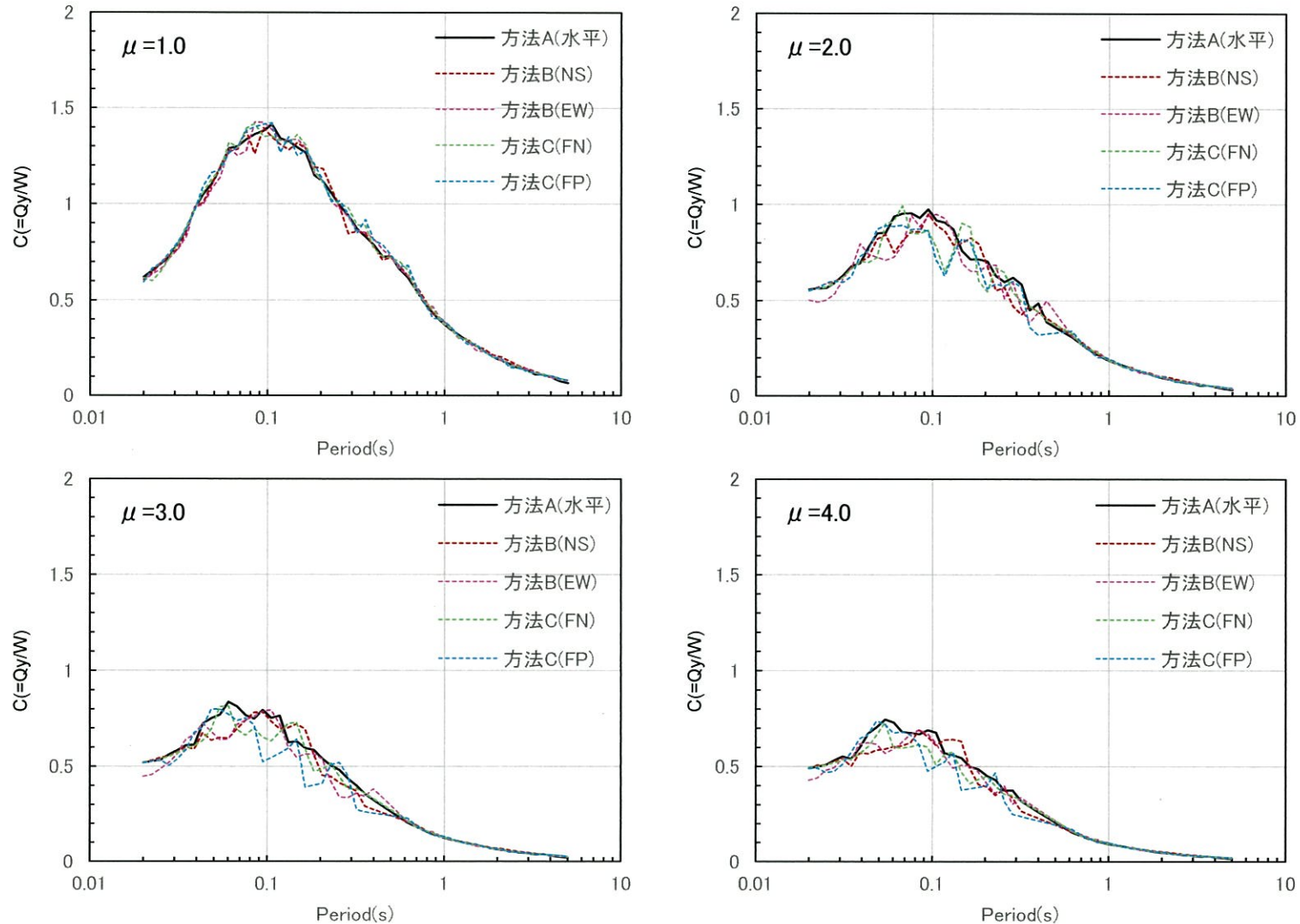
塑性率が $\mu$ が所定の値となるような降伏せん断力 $Q_y$ を算出

降伏せん断力 $Q_y$ を重量 $W$ で除して降伏せん断力係数 $C$ を算出

周期 $T$ に応じて算出

## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 前頁に基づき算出した弾塑性応答スペクトルは、塑性率が大きくなるにつれ、短周期側（1秒程度以下）において、方法Aが方法B及び方法Cより大きい傾向。



方法A～Cに基づく模擬地震波の弾塑性応答スペクトル

## 【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 前頁までの検討（①～③）によると、方法B及び方法Cに基づき作成した模擬地震波に比べ、方法Aに基づき作成した模擬地震波のほうが優位性が確認される。
- 以上を踏まえ、標準応答スペクトルを考慮した地震動は、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法を採用した。



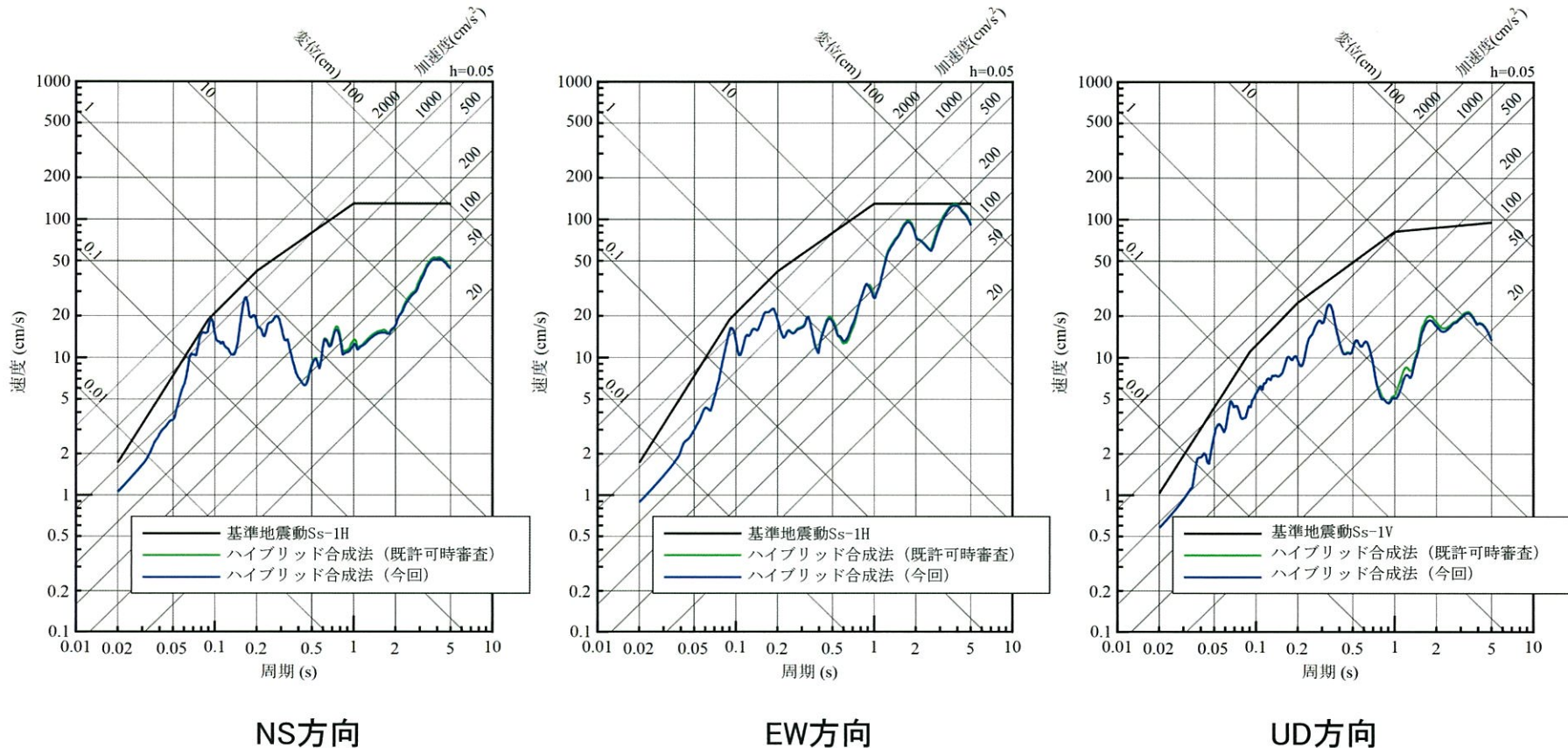
### 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動を評価するにあたり、既許可の地下構造モデルの地盤減衰を精緻化したことに伴い、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の影響評価を実施。
  - ・ 検討用地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価において、経験的グリーン関数法と理論的方法によるハイブリッド合成法を実施。
    - ⇒ 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用いて、再度、理論的方法による地震動評価を実施し、経験的グリーン関数法とのハイブリッド合成法による評価を実施(65、66頁参照)。
  - ・ 既許可時審査においては、経験的グリーン関数法による地震動評価の妥当性確認のため、経験的グリーン関数法と理論的方法のハイブリッド合成法(以下、「EGF+理論」とする。)による地震動評価と統計的グリーン関数法と理論的方法のハイブリッド合成法(以下、「SGF+理論」とする。)による地震動評価の比較を実施(67、68頁参照)。
    - ⇒ 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用いて、再度、EGF+理論による地震動評価とSGF+理論による地震動評価の比較を実施(69、70頁参照)。
- 以上より、既許可の地下構造モデルの地盤減衰を精緻化したことが、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」に与える影響がないことを確認。

## 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

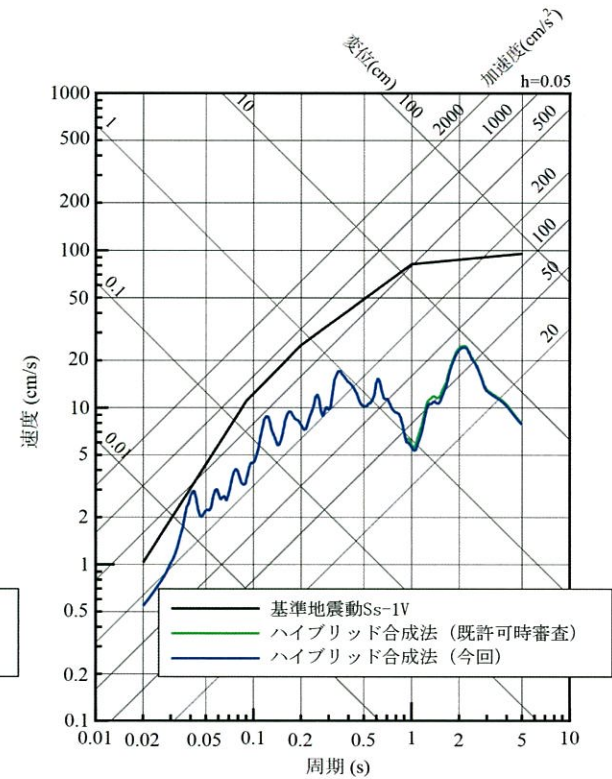
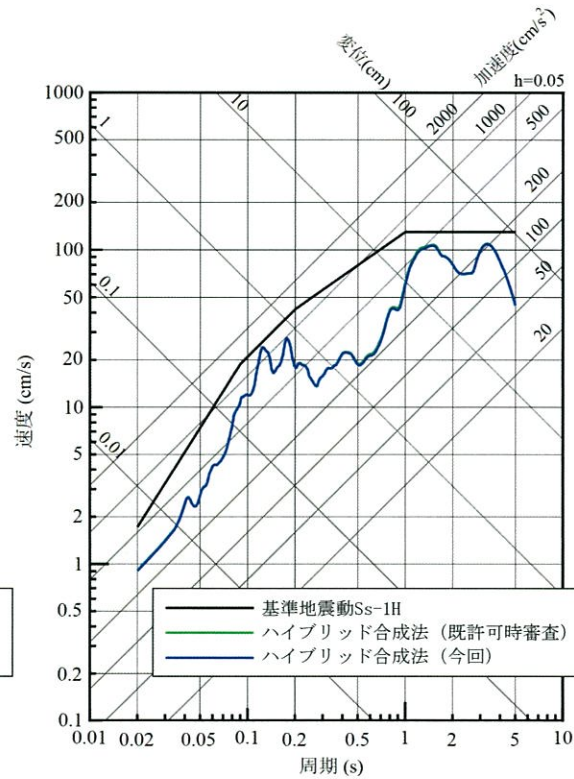
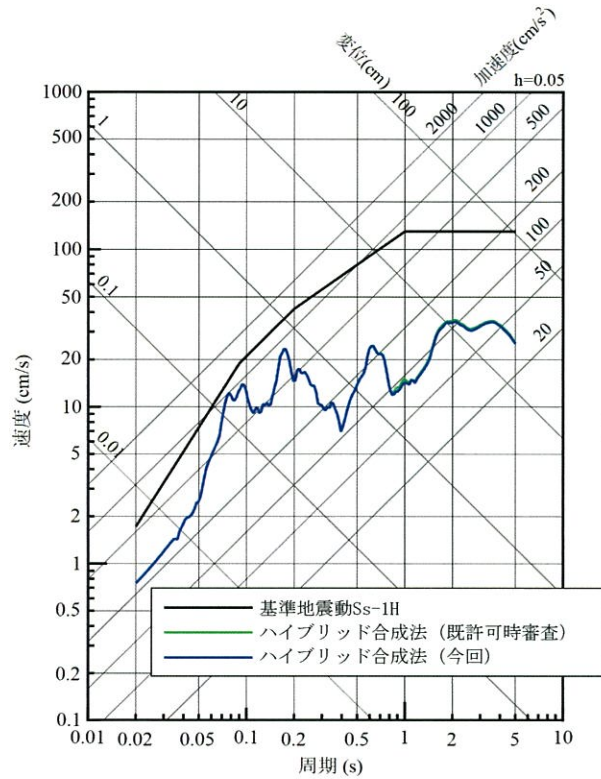
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いて、再度、理論的方法による地震動評価を実施し、経験的グリーン関数法とのハイブリッド合成法による評価を実施した結果、既許可のハイブリッド合成法による地震動評価結果と同等であることを確認。

「甌断層帯甌区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：巨視的断層面下端）



# 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

「断層帯断層区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：アスペリティ下端）

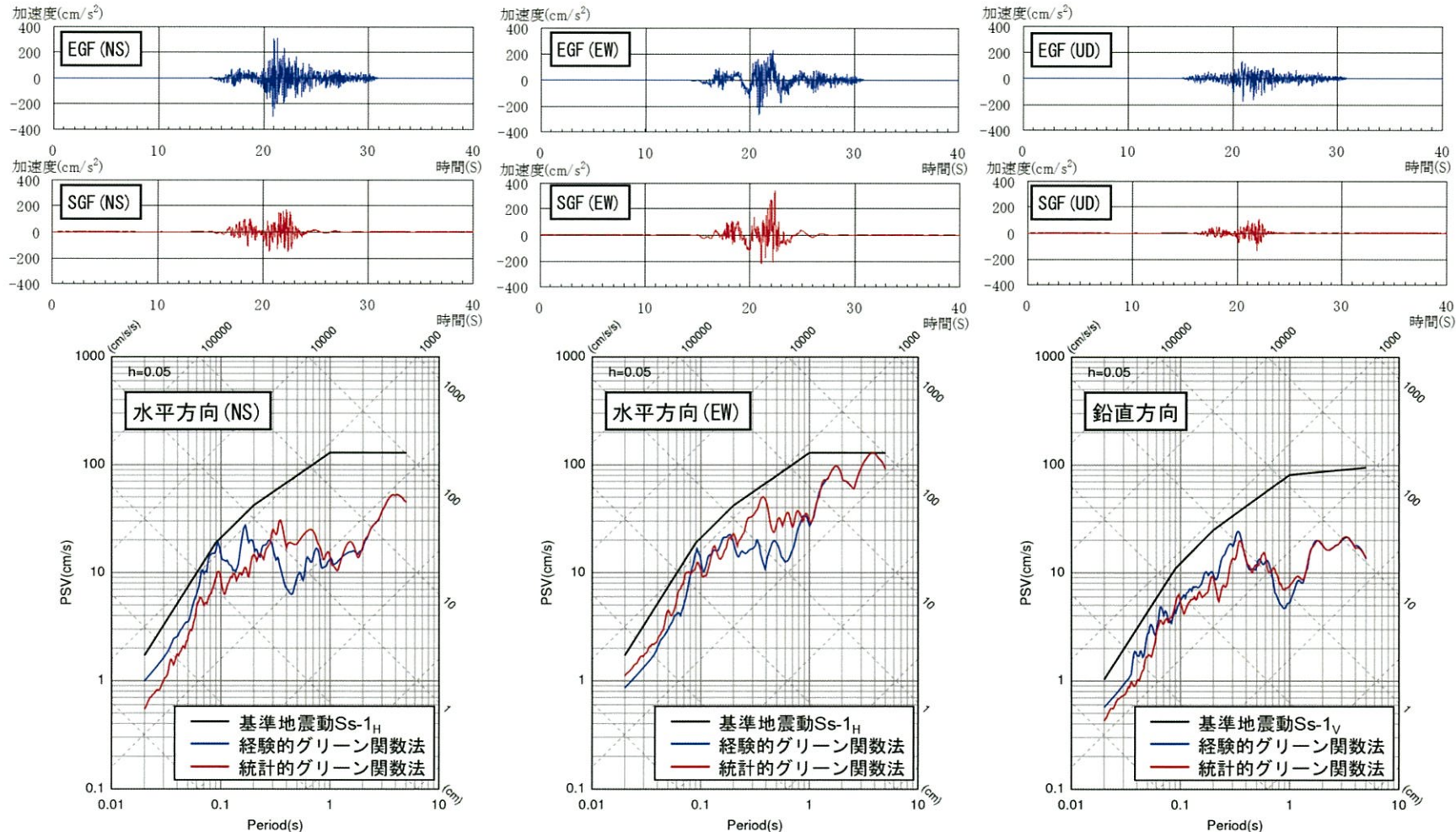


# 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

「甌断層帯甌区間」による地震の応力降下量の不確かさを考慮した統計的グリーン関数法による地震動評価

- 統計的グリーン関数法による地震動評価で用いる要素地震については、Boore (1983)<sup>33)</sup>による理論スペクトルと佐藤 (2004)<sup>34)</sup>による経時特性を用いて、地震基盤における地震波を作成。
- 地震基盤における地震波を次元波動論により、解放基盤波を作成。
- 上記の要素地震を用い、Dan et al. (1989)<sup>28)</sup>により波形合成を行い、理論的方法とハイブリッド合成。

第114回  
審査会合資料

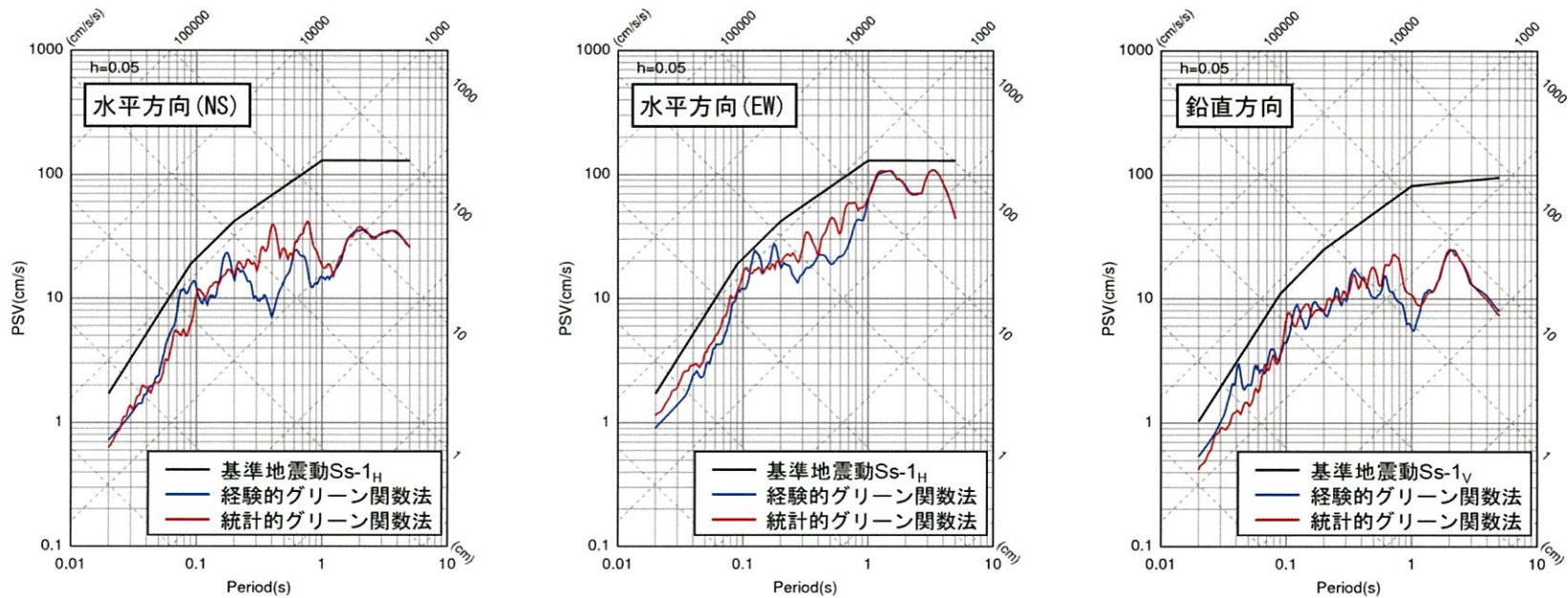
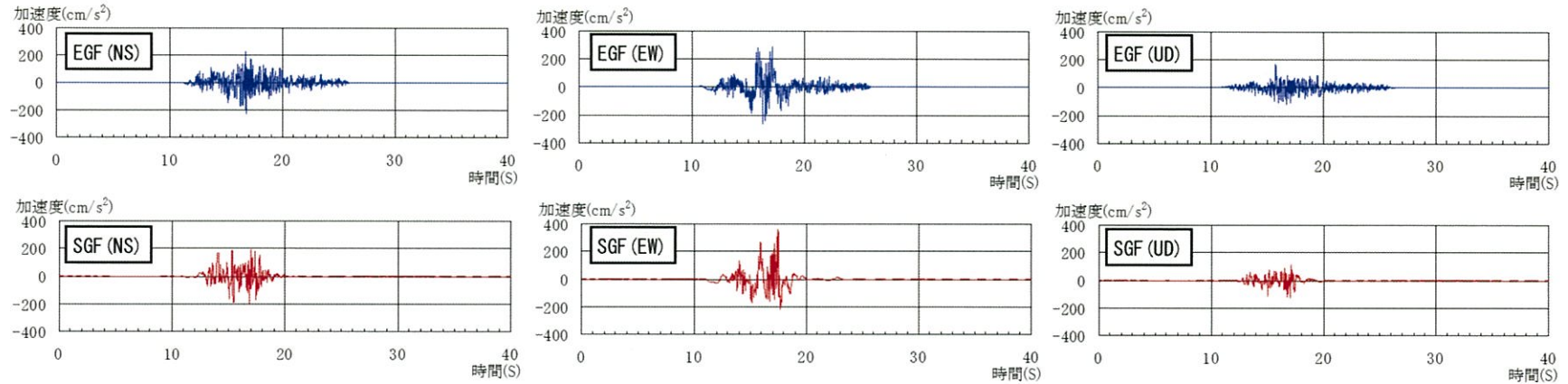


統計的グリーン関数法による地震動評価との比較(破壊開始点：巨視的断層面下端)

# 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

第114回  
審査会合資料

## 統計的グリーン関数法による地震動評価

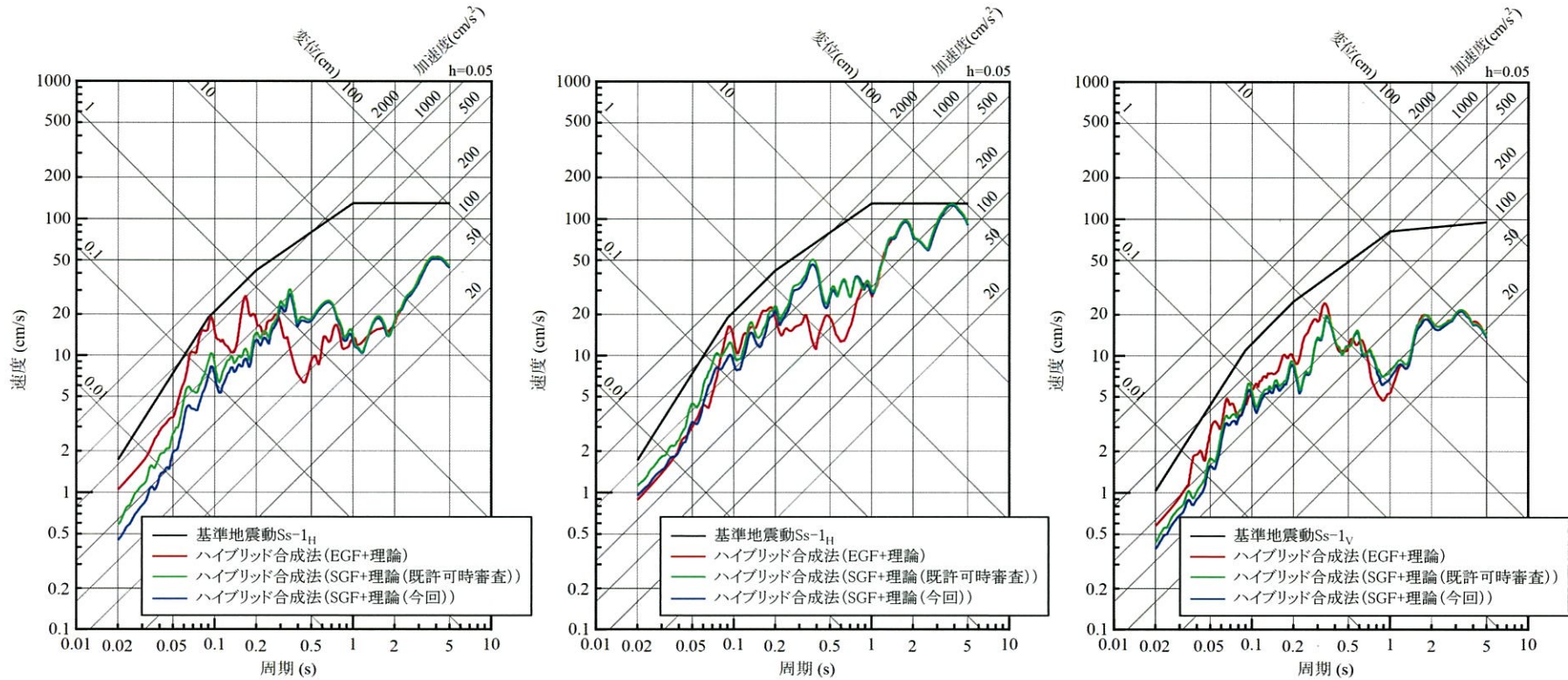


統計的グリーン関数法による地震動評価との比較(破壊開始点：アスペリティ下端)

## 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 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用いて、再度、EGF+理論による地震動評価とSGF+理論による地震動評価の比較を実施した結果、既許可の経験的グリーン関数法による地震動評価結果の妥当性を再確認。

「甌断層帯甌区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：巨視的断層面下端）



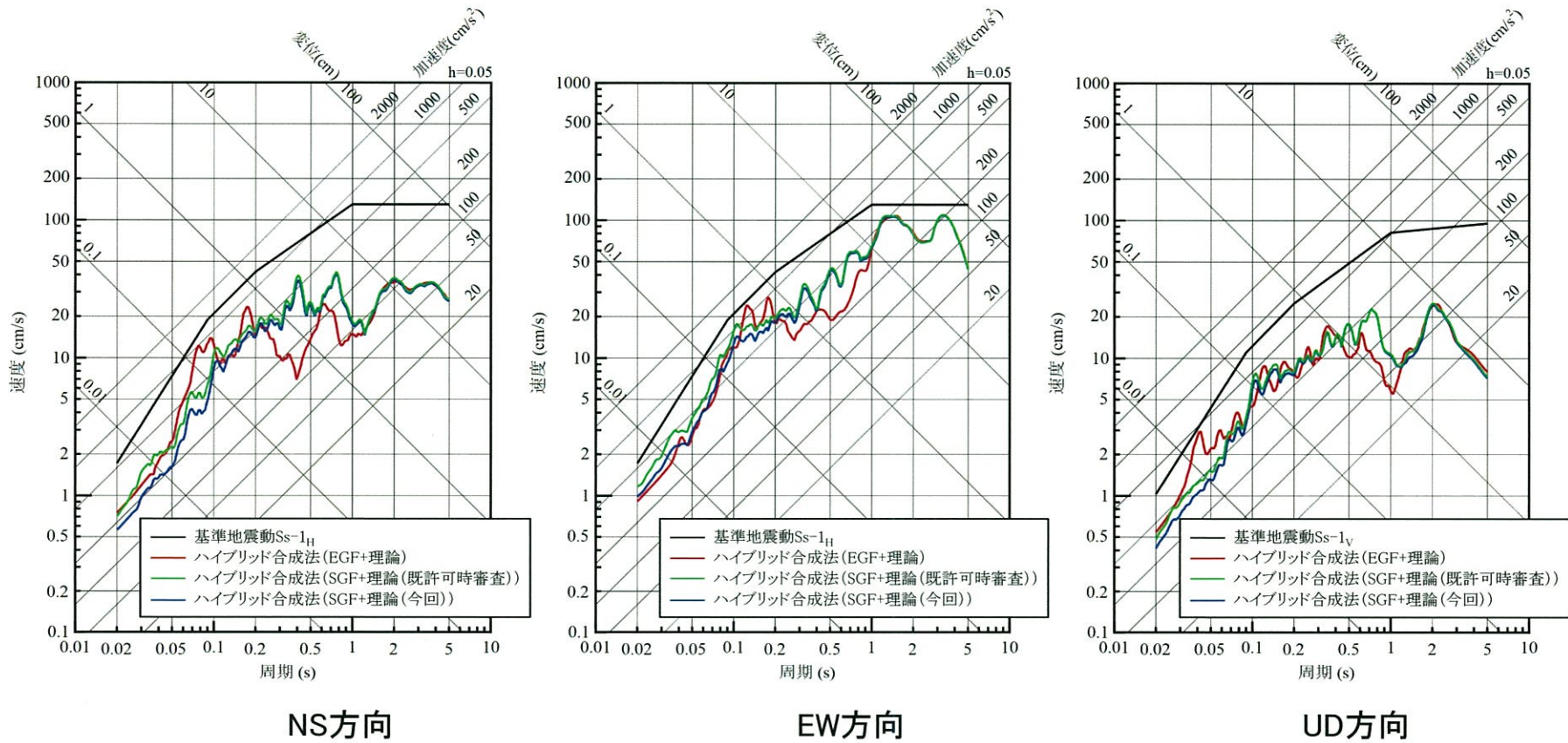
NS方向

EW方向

UD方向

# 【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

「甌断層帯甌区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：アスペリティ下端）



## 参考文献

- 1) R. Fukushima, H. Nakahara, and T. Nishimura (2016): Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 552–559.
- 2) Riga, Evi, F. Hollender, A. Roumelioti, P.–Y. Bard, and K. Pitilakis (2019): Assessing the Applicability of Deconvolution of Borehole Records for Determining Near-Surface Shear-Wave Attenuation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 109, No.2, pp. 621–635.
- 3) John G. ANDERSON(2004): QUANTITATIVE MEASURE OF THE GOODNESS-OF-FIT OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 243, August 1–6, 2004.
- 4) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎(2019): 九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定、(その1) ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、21238、2019年9月。
- 5) 中尾隆、本村一成、赤司二郎、友澤裕介、加藤研一(2019): 九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定、(その2) 距離減衰特性の方位性、サイト増幅特性、震源特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、21239、2019年9月。
- 6) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書、令和元年8月7日。
- 7) 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.
- 8) 加藤研一、武村雅之、八代和彦(1998): 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震第2輯、51巻、123–138.
- 9) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書 参考資料 標準応答スペクトルに係る検討について、令和元年8月7日。
- 10) 日本電気協会(2015): 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601–2015.
- 11) 壇一男、具典淑、武藤真菜美(2010): 地表の短い活断層から想定される地中の震源断層のモデル化と強震動の試算、日本建築学会構造系論文集、第75巻 第648号、279–288、2010年2月。
- 12) 佐藤智美・岡崎敦(2013): 地震動の経験的経時特性モデルへの破壊伝播補正モデルと周期間相関モデルの導入、日本建築学会構造系論文集、第78巻 第684号、289–298、2013年2月。
- 13) 水谷浩之、西村功、敦賀隆史、荻原実、柏崎琢也、真下貢(2008): 平成19年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の観測記録に基づく揺れの強さ指標の比較(最大加速度振幅、SI値及び累積絶対速度CAV値)、日本建築学会大会学術講演梗概集、21508、2008年9月。