

# 川内原子力発電所 1号炉及び2号炉

## 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における 地下構造モデルの設定について (コメント回答方針)

2023年2月10日

九州電力株式会社

# 目次

1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール	P. 2
2. 地震観測記録等に見られる特徴的なピークの生成要因分析及び今後の対応方針	P. 6
2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析	P. 8
2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析	P. 15
2.3 特徴的なピークの生成要因分析結果を踏まえた今後の対応方針	P. 27
3. 地下構造モデルの再検討（方針）	P. 28
3.1 地下構造モデルの妥当性確認に関する方針見直し	P. 29
3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）	P. 33
4. 地下構造モデルの設定（方針）	P. 39
参考資料① 友澤ほか(2021)のブロックインバージョン結果の確認	P. 42
参考資料② ブロックインバージョンにおける残差	P. 46
参考資料③ 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認状況	P. 51
参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況	P. 56



## 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

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

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

No.	コメント	指摘場所	対応状況
11	地震動評価にあたって、どのような地下構造モデルを使うのか方針を示すこと。	第1049回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年5月20日)	第1057回会合にて説明
12	全体スケジュールを考慮した上で、地下構造モデル設定、地震動評価及び全体方針を示すこと。		第1057回会合にて説明
13	審査全体を見通した上で、スケジュールを示すこと。	第1057回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年7月1日)	第1080回会合にて説明
14	今回地下構造モデルの方針を変更していることから、説明済みとなっているコメントに関しても、改めて説明すること。		コメントNo. 1, 2, 8について 第1103回会合にて説明
15	新たなボーリング調査から得られる結果を踏まえ、設定した地下構造モデルの妥当性を示すこと。		第1103回会合にて説明
16	今後説明予定の新たに設定した地下構造モデルの妥当性について、適切な論理で十分な根拠に基づき説明すること。	第1080回、第1088回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年10月7日、 令和4年10月28日)	説明方針： 第1088回会合にて説明 コメント回答： 第1103回会合にて説明
17	審査事項に係る方針・考え方を準備ができたものから前倒して説明する等、効果的かつ効率的な審査スケジュールを示すこと。		適宜説明
18	地下構造モデルについて、地震観測記録等に見られる一部の周期帯におけるピークが適切に評価できていないことを踏まえ、検討すること。	第1103回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和4年12月16日)	説明方針： 今回説明 コメント回答： 次回以降説明予定

# 1. コメントリスト及び今後の審査スケジュール

項目	内容	関連コメント	対応方針	2022年度										2023年度									
				7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...			
地下構造モデル位置付け	・既許可モデルと新たに設定したモデルの位置付け	No.7	・既許可モデルと新たに設定したモデルは検討の目的に応じて設定することを明記						▼★第1080回														
	・既許可の地震動評価への影響	No.2	・新たな地下構造モデルによる既許可の基準地震動への影響確認を実施							▼★第1103回					▽☆								
地盤減衰	・地盤減衰の設定および妥当性確認	No.1 No.8 No.18	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震観測記録に基づく伝達関数の分析、地震波干渉法、友澤ほか(2021)等、複数の手法により設定</li> <li>地震計設置以浅について、観測記録による応答スペクトルの比較等により妥当性を確認</li> <li>地震計設置以深は、追加調査等を基に地震計設置以浅で設定した地盤減衰と同等であることを多面的な検討により確認</li> </ul>						(方針) 第1103回 ▼★														
				<div data-bbox="1361 742 1579 805" style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">                     [友澤ほか・岩石コア・ボーリング孔内]                 </div>																			
	・設定した地下構造モデルの妥当性	No.15 No.16 No.18	・追加調査を踏まえたPS検層モデルとの比較、地震観測記録に基づき設定した友澤ほか(2021)の手法等により妥当性を確認						(方針) 第1103回 ▼★														
地震基盤相当面	・設置許可基準規則解釈別記2の定義に基づく設定	No.3 No.9	・ $V_s=3,010m/s$ の層上面に設定						★第1057回														
模擬地震波	・乱数位相を用いた地震動評価	No.10	・先行他社と同様に、M7.0、 $X_{eq}10km$ で継続時間を設定						(方針) 第1097回 ▼★														
	・複数の手法による検討	No.4	・先行他社と同様に、複数の手法による検討により、乱数位相を用いた地震波を選定した妥当性を説明						(方針) 第1097回 ▼★														
基準地震動策定	・ $S_s-3$ の策定	-	・地震基盤相当面、地盤減衰、模擬地震波の設定を踏まえ、 $S_s-3$ を策定																				
基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価	・ $S_s-3$ による評価	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準地震動見直し後の基礎地盤及び周辺斜面の安定性の評価を実施</li> <li>評価条件は、既許可申請と同じもので評価</li> </ul>						(方針) 第1097回 ▼★														
補正申請	-	-	-																	◇			

- ▼: 資料提出(実績)
- ▽: 資料提出(予定)
- ★: 審査会合(実績)
- ☆: 審査会合希望時期

## 2. 地震観測記録等に見られる特徴的なピークの生成要因分析及び今後の対応方針

## 2. 地震観測記録等に見られる特徴的なピークの生成要因分析及び今後の対応方針

### ■ 第1103回審査会合におけるご指摘

- 地下構造モデルについて、地震観測記録等に見られる一部の周期帯におけるピークが適切に評価できていないことを踏まえ、検討すること。



#### ① PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析 (2.1節)

- PS検層モデルの $V_s$ を変更した伝達関数の検討を実施。(第1103回審査会合にてご説明)
- PS検層モデルによる伝達関数に見られる特徴的なピークは、速度構造のコントラストによるものであると考えられる。(第1103回審査会合にてご説明)

#### ② 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析 (2.2節)

- 地震観測記録の伝達関数と理論伝達関数の比較を実施。
- 地震観測記録に見られる特徴的なピークの要因は、EL. -58.5mからEL. -118.5mの範囲の速度構造にあると考えられる。

#### ③ 特徴的なピークの生成要因分析結果を踏まえた今後の対応方針 (2.3節)



## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 地下構造モデルの検討・設定及び妥当性確認の流れ (当初の方針)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

#### 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料3 2.2.1項 (1) (2)】

発電所敷地で取得した地震観測記録に基づき、解放基盤表面から最深部地震計 (EL. -118.5m) までの範囲の地盤減衰 (Q値) を、以下の手法で検討した結果、上限値は $Q=8.0$ 程度。

- ・伝達関数 (周波数依存型) による検討 ( $Q=7.6$ 程度)
- ・伝達関数 (バイリニア型) による検討 ( $Q=5.8$ 程度)
- ・地震波干渉法による検討 ( $Q=8.0$ 程度)

地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定。

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

#### 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料3 2.2.2項 (1) (2)】

- ・速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認。
- ・発電所敷地で取得した地震観測記録に基づく地盤増幅率 (以下、「経験的地盤増幅率」と理論増幅率の残差が最小となる $Q=12.5$ の層下面深度を検討し、 $Q=12.5$ をEL. -200m以深まで適用できることを確認。

$Q=12.5$ の適用範囲は、保守的にEL. -200mまでに設定。

地下構造モデル

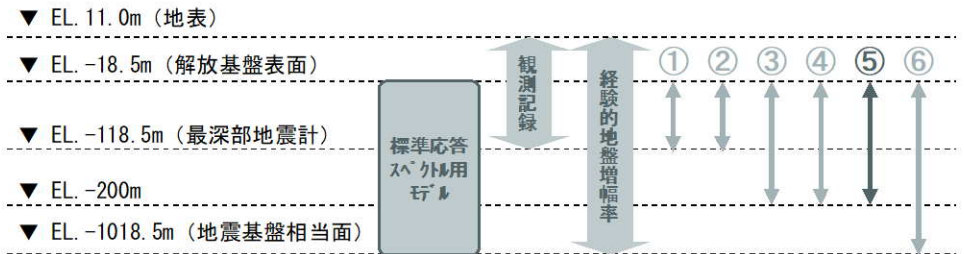
#### 地下構造モデルの設定【第1103回審査会合 資料3 2.3節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ に設定。

※1: 震源車による人工震源を用いた減衰測定。振幅レベルや周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

※2: 岩石コア供試体を用いた超音波試験による減衰測定。岩盤の不均質性による減衰が含まれていない点や周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

### 第1103回審査会合資料より抜粋 (一部修正)



#### 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料3 2.2.1項 (3)】

$Q=12.5$ の妥当性を以下の観点で確認。

- ・ $Q=12.5$ の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 (①)
- ・卓越周波数において、 $Q=12.5$ による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する (②)

#### 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料3 2.2.2項 (3)】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰 (Q値) とする妥当性を以下の観点で確認。

- ・ボーリング孔内測定による減衰※1 (③) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である
- ・岩石コアを用いた測定による減衰※2 (④) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

#### 地下構造モデルの妥当性確認【第1103回審査会合 資料3 2.4節】

設定した地下構造モデルの妥当性を以下の観点で確認。

- ・設定した地下構造モデルの伝達特性 (伝達関数、応答スペクトル比) が、追加ボーリング調査結果※1を踏まえたPS検層モデルの伝達特性に対して同等もしくは上回る (⑤) [EL. -200m～解放基盤表面]
- ・設定した地下構造モデルの地盤増幅率が、経験的地盤増幅率に対して同等もしくは上回る (⑥) [地震基盤相当面～解放基盤表面]

## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 地下構造モデルの妥当性確認

第1103回審査会合資料より抜粋

#### (1) 追加ボーリング調査結果との比較による確認

- 追加調査により得られた層厚、Vs、Vp、Q値を基に、PS検層モデルを設定。
- 標準応答スペクトル用モデルとPS検層モデルによる伝達特性（伝達関数、応答スペクトル）の比較により、標準応答スペクトル用モデル（EL. -200m～解放基盤表面）の妥当性を確認。

地表 ▼ (EL. 11.0m)	標準応答スペクトル用モデル			PS検層モデル				
解放基盤表面 ▼ (EL. -18.5m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	伝達特性	伝達特性	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -28.5m)	1500	3200	12.5	↑ 比較 ↓ { ・伝達関数 ・応答スペクトル }	↑ 比較 ↓	PS検層結果		
▼ (EL. -58.5m)	1600	3700	12.5			PS検層結果		
▼ (EL. -118.5m)						PS検層結果		
▼ (EL. -200m)	1600	3700	100			PS検層結果		
▼ (EL. -480m)	2150	4400	200					
▼ (EL. -1018.5m)	3010	5200	200					

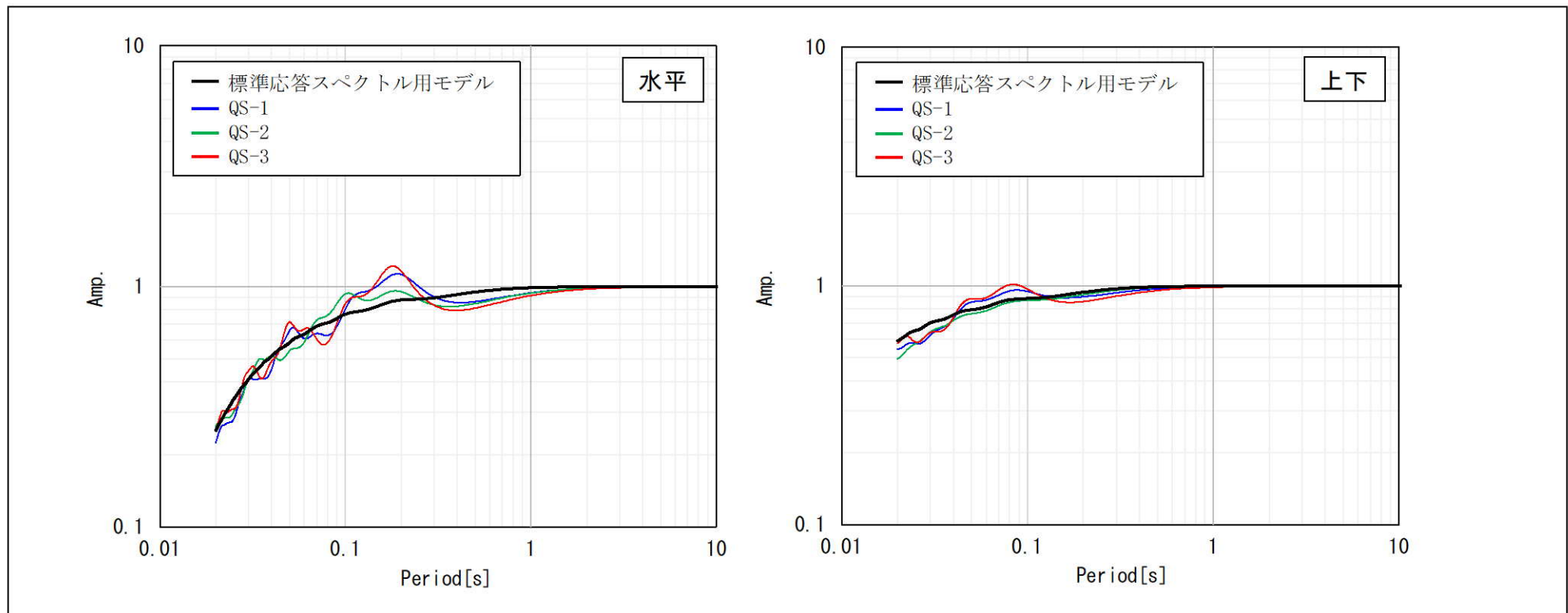
検討イメージ

## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ PS検層モデルとの比較による妥当性確認結果（第1103回審査会合にてご説明）

- PS検層モデルによる伝達関数の一部の周期帯において、特徴的なピークを確認。
- 特徴的なピーク（水平：0.1~0.2秒付近）は、速度構造のコントラストによるものであると考えられる。
  - 標準応答スペクトル用モデルの地盤減衰（Q値）を大きくした場合でも、QS-1~QS-3の特徴的なピークを再現できないことから、地盤減衰（Q値）によるものではないと判断。【11頁参照】
  - PS検層モデルのVsを変更した検討の結果、特徴的なピークが低減されることから、速度コントラストの影響によるものであると判断。【12~14頁参照】

第1103回審査会合資料より抜粋



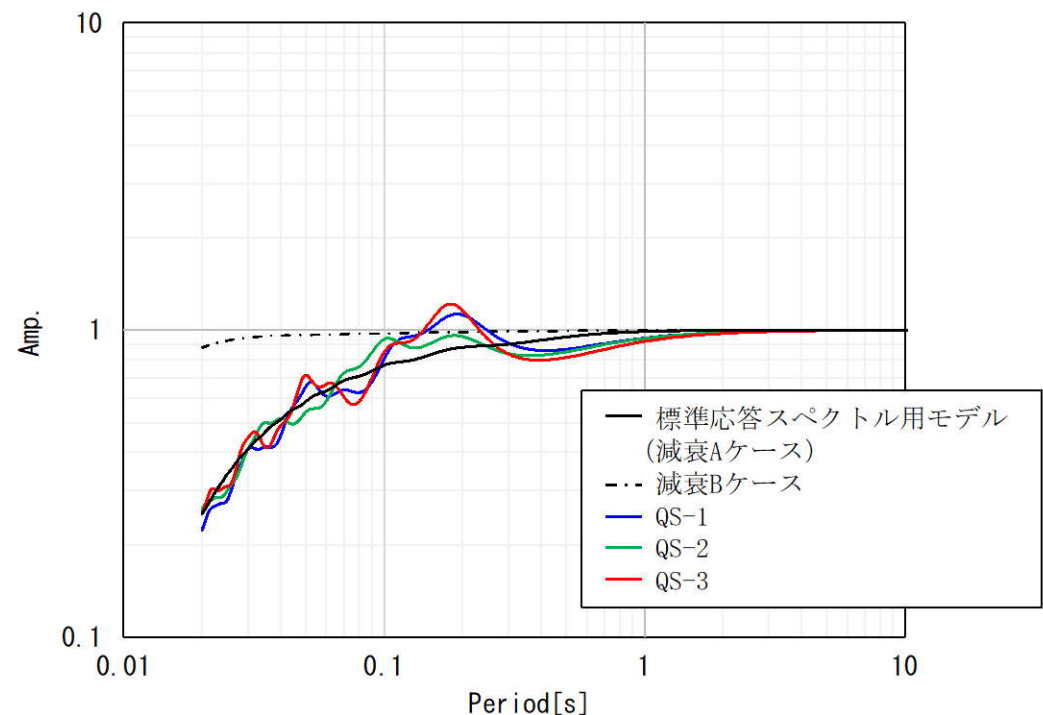
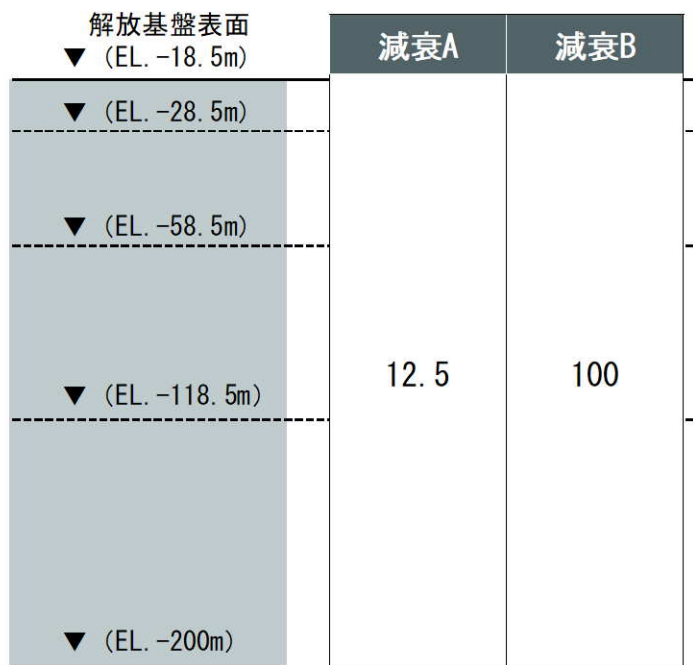
PS検層モデルによる伝達関数との比較

## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 地盤減衰（Q値）による影響確認

第1103回審査会合資料より抜粋

- 今回の標準応答スペクトル用モデルは地盤減衰（Q値）を鉛直アレイの地震観測記録や最新の知見に基づく評価により設定している。
  - 特徴的なピーク（水平：0.1～0.2秒付近）の生成要因を確認するため、地盤減衰（Q値）を変更した検討を実施。
  - 標準応答スペクトル用モデルの地盤減衰（Q値）を大きくした場合（既許可の地盤減衰（ $Q=100$ ）とした場合）でも、QS-1及びQS-3の特徴的なピークを再現できない。
- ▼
- QS-1～QS-3の伝達関数に見られる特徴的なピークは、地盤減衰（Q値）によるものではないと考えられる。



## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 速度構造による影響確認

第1103回審査会合資料より抜粋

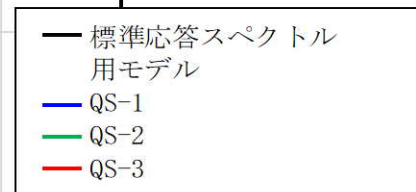
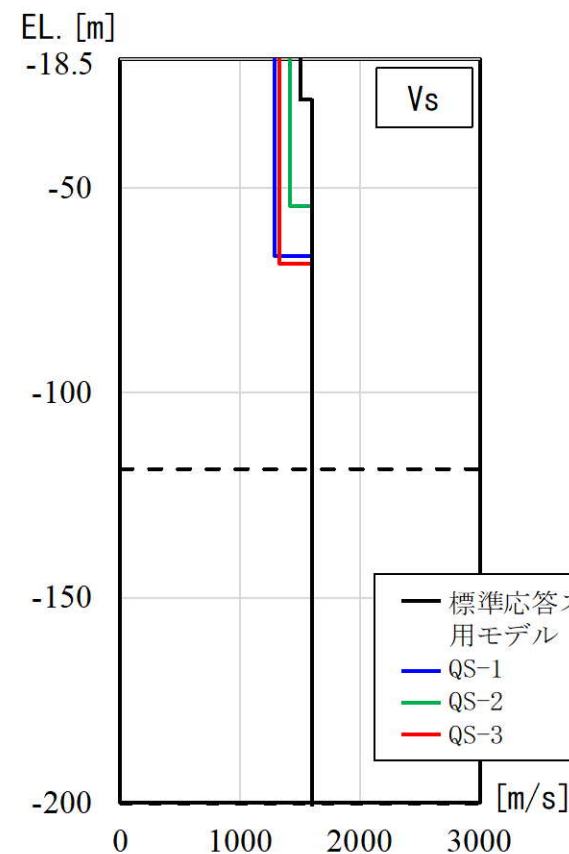
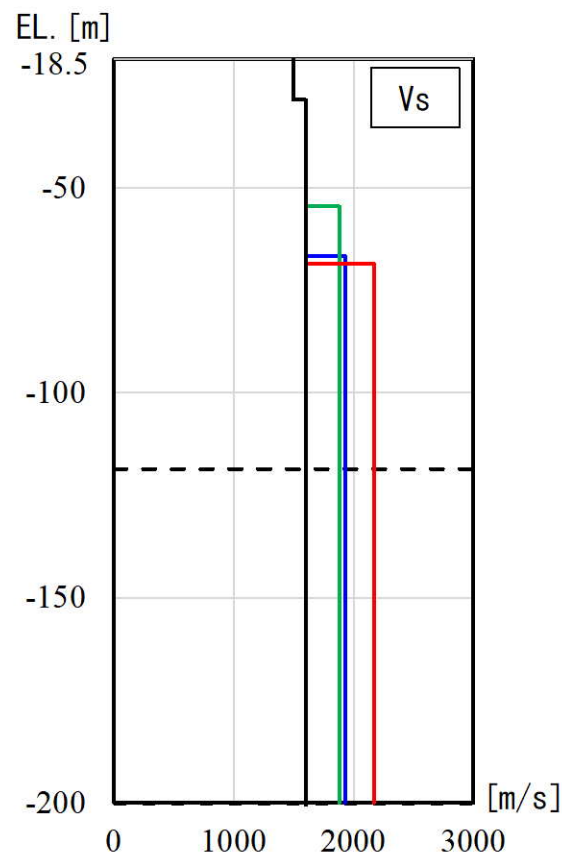
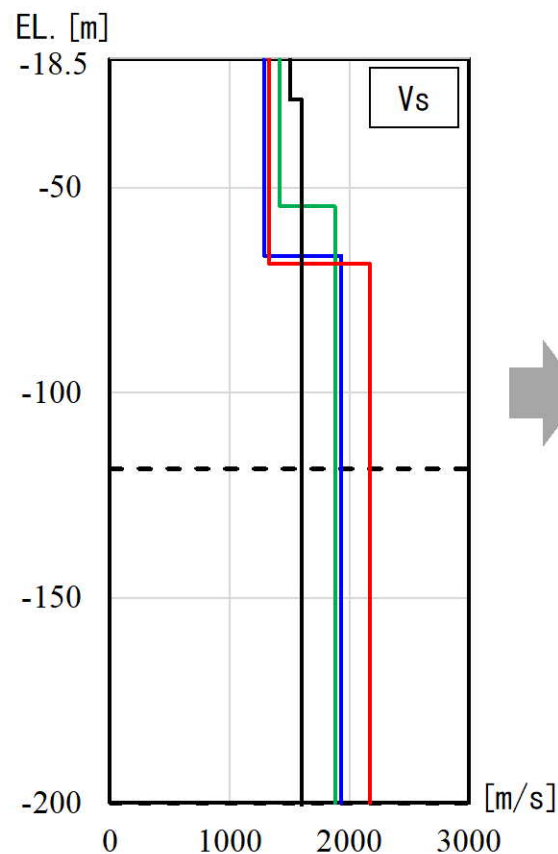
- 標準応答スペクトル用モデルは、速度構造のコントラストがほとんどない。一方、PS検層モデルは、全孔ともに、標準応答スペクトル用モデルと比べてコントラストが大きい。
- 特徴的なピーク（水平：0.1~0.2秒付近）との関連性を確認するため、速度構造を以下に設定した検討を実施。

①浅部の速度を既許可モデルの速度とした場合（浅部の速度のみを速くした場合）

②深部の速度を既許可モデルの速度とした場合（深部の速度のみを遅くした場合）

①浅部の速度を既許可モデルの速度とした場合

②深部の速度を既許可モデルの速度とした場合



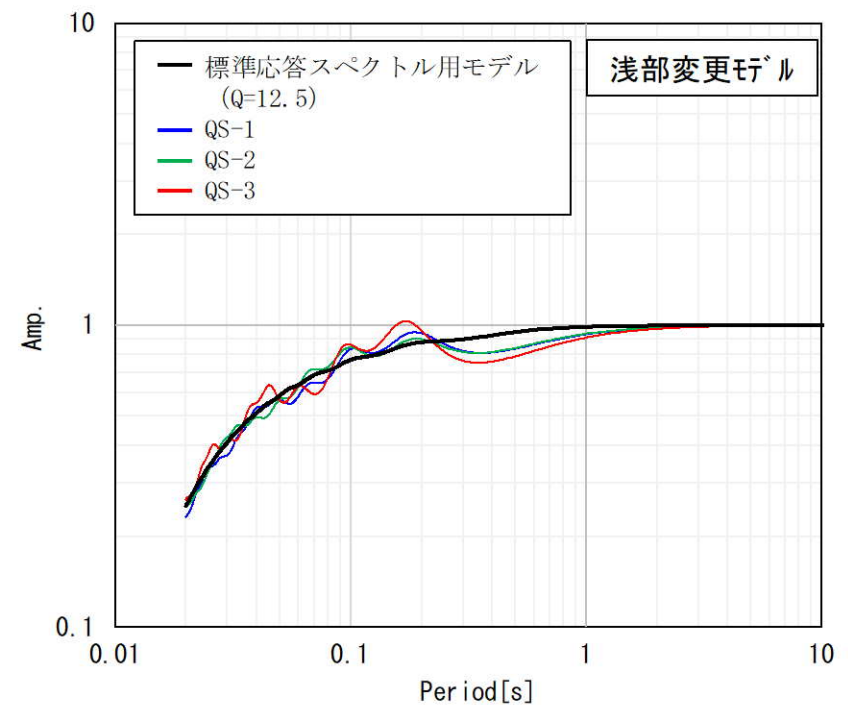
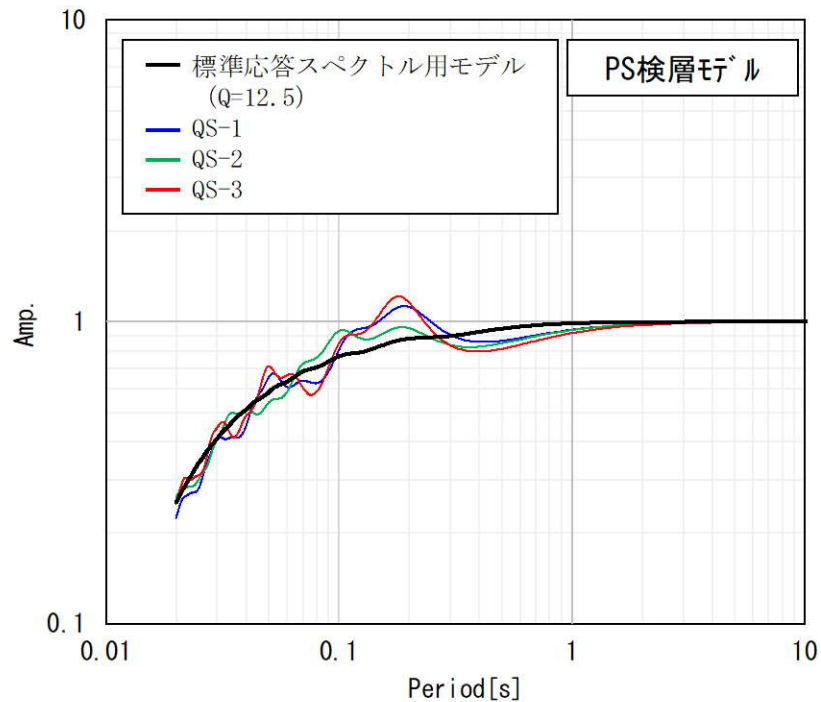
## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 速度構造による影響確認

第1103回審査会合資料より抜粋

#### ■ ①浅部の速度を既許可モデルの速度とした場合（浅部の速度のみを速くした場合）

- 浅部の速度を変更した結果、QS-1～QS-3の伝達関数は、0.1～0.2秒付近に見られた特徴的なピークが低減される。



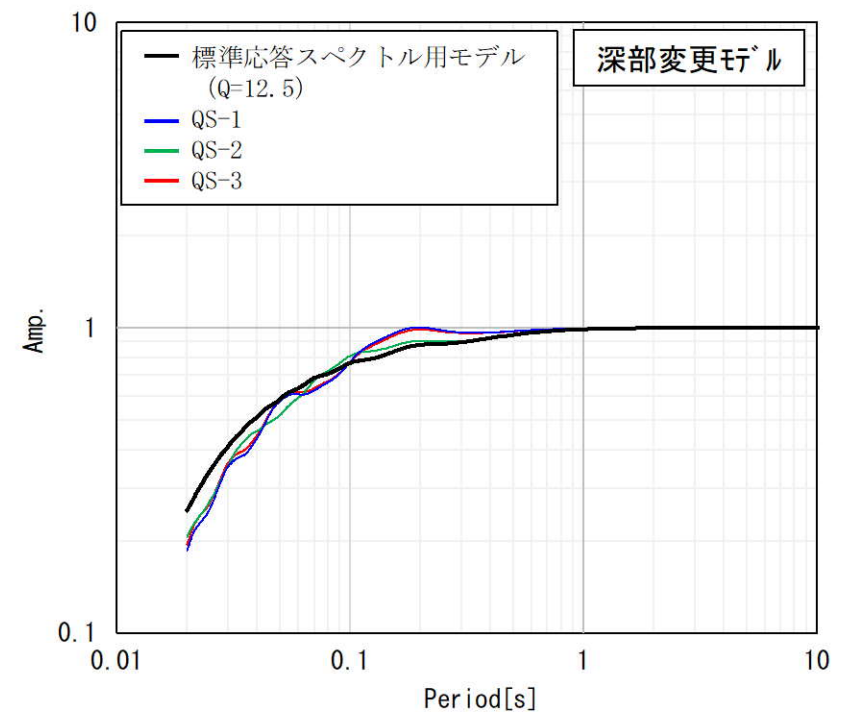
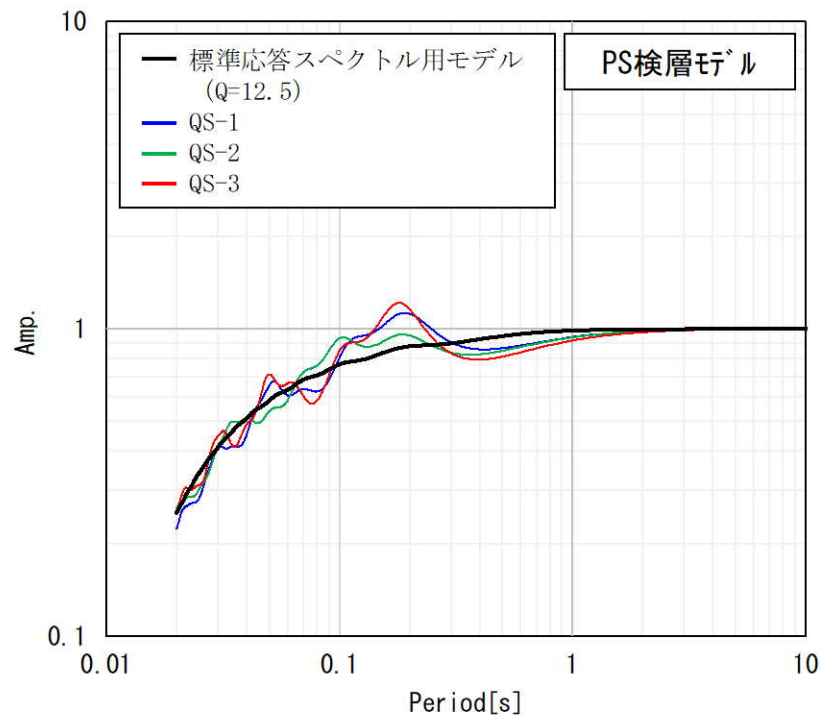
## 2.1 PS検層モデルの伝達関数に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 速度構造による影響確認

第1103回審査会合資料より抜粋

#### ■ ②深部の速度を既許可モデルの速度とした場合（深部の速度のみを遅くした場合）

- 深部の速度を変更した結果、QS-1～QS-3の伝達関数は、0.1～0.2秒付近に見られた特徴的なピークが低減される。
- QS-1～QS-3の伝達関数に見られる特徴的なピークは、速度構造のコントラストによるものであると考えられる。

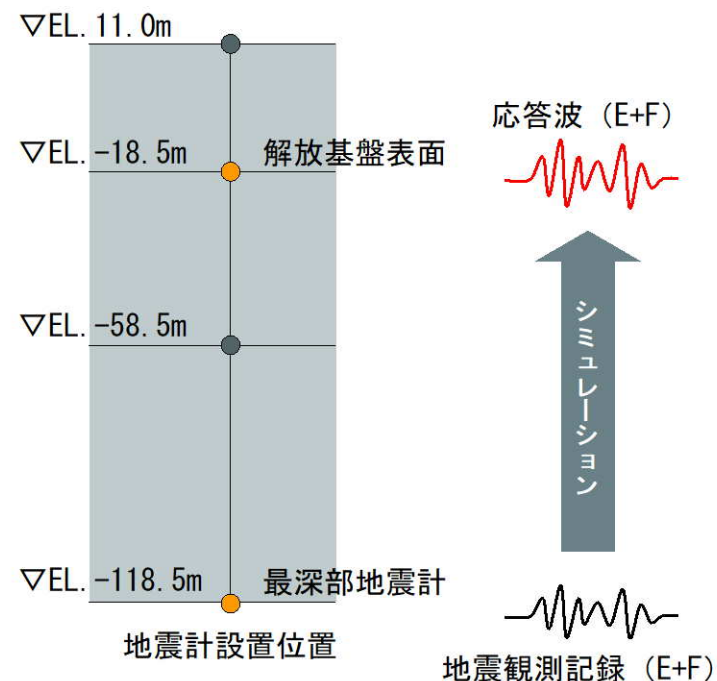


## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 解放基盤表面（EL. -18.5m）における地震観測記録の応答スペクトルの確認

- 第1103回審査会合でのご指摘を踏まえ、改めて、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。
- 解放基盤表面（EL. -18.5m）における地震観測記録の応答スペクトルには、PS検層モデルによる伝達関数に見られる一部の周期帯における特徴的なピークが見られることを確認。

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

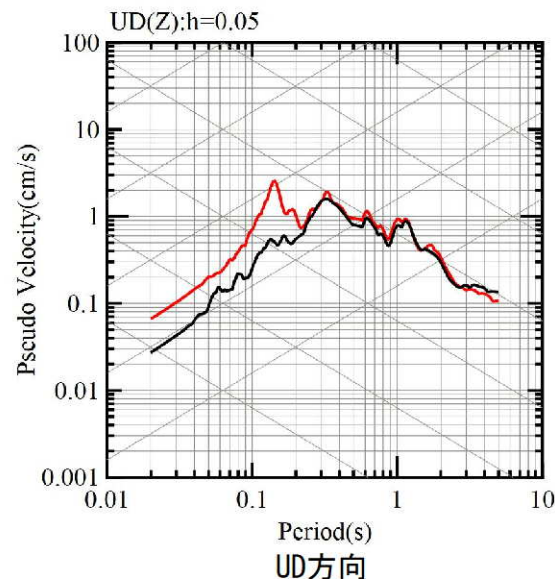
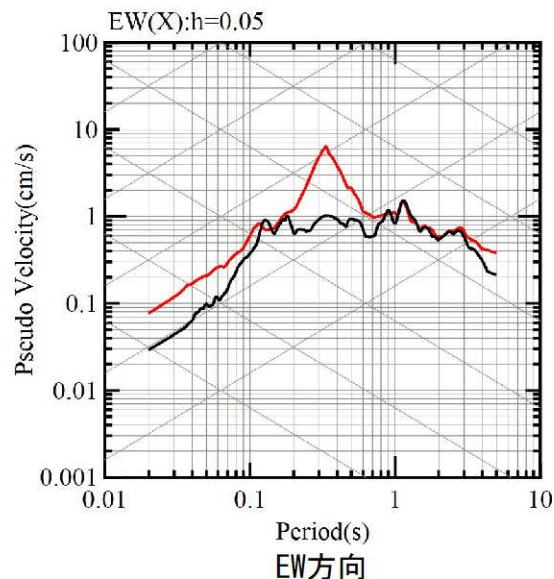
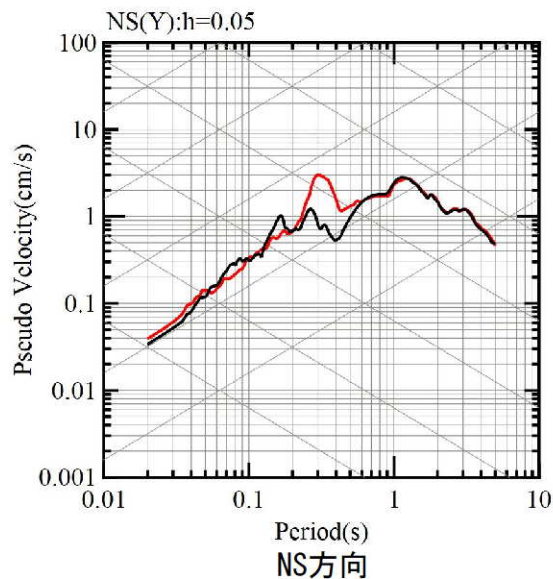




## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

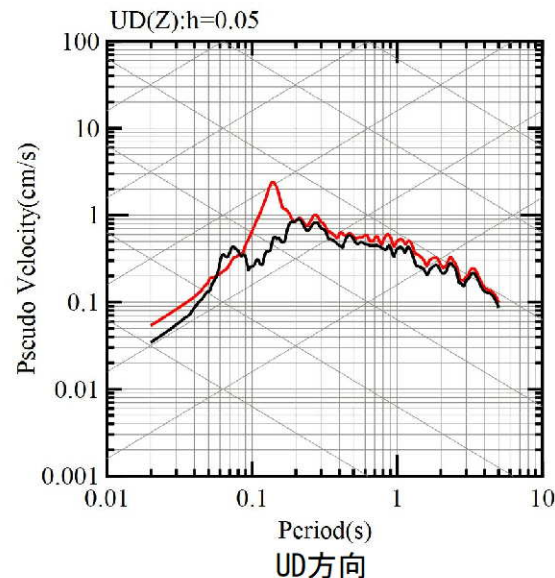
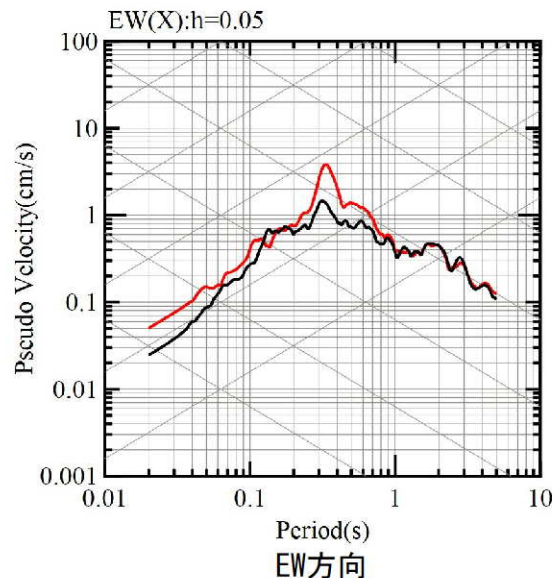
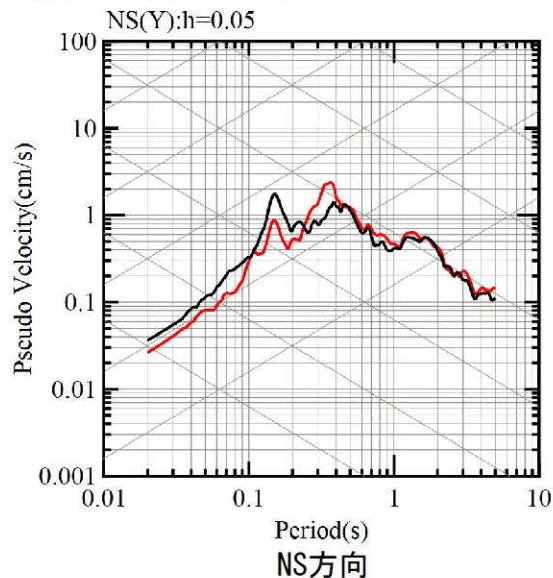
### ■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

#### ①九州西側海域



— 観測記録 EL.-18.5m  
— 応答波(Q=12.5)

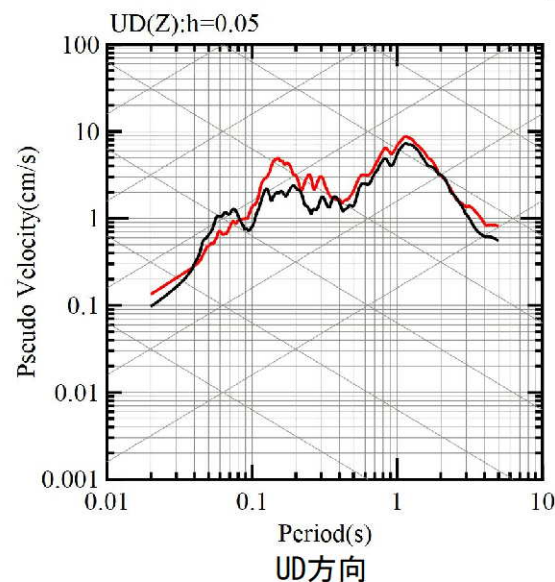
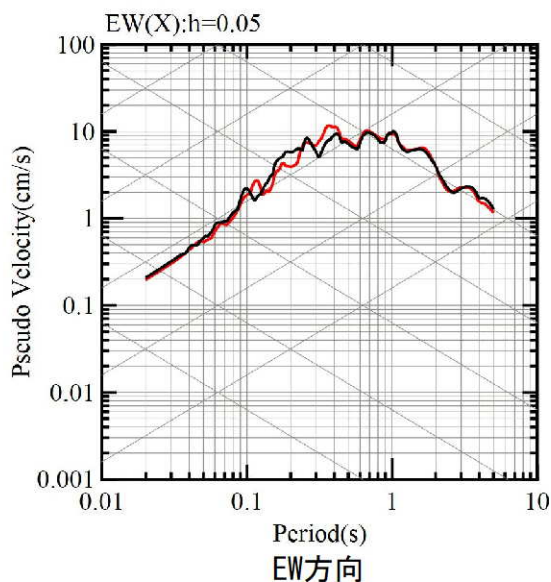
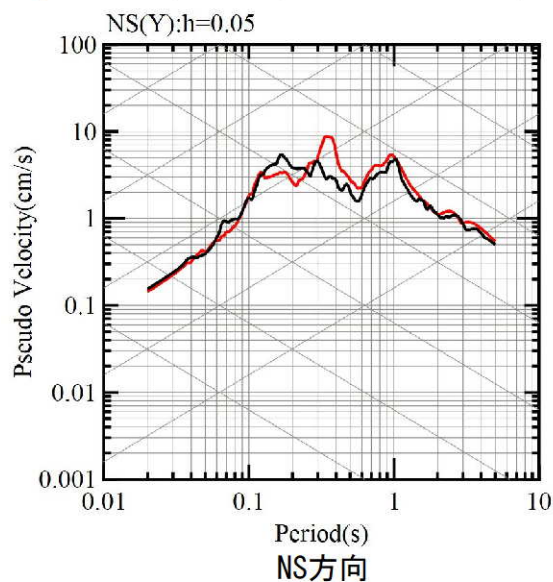
#### ②鹿児島県北西部



## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

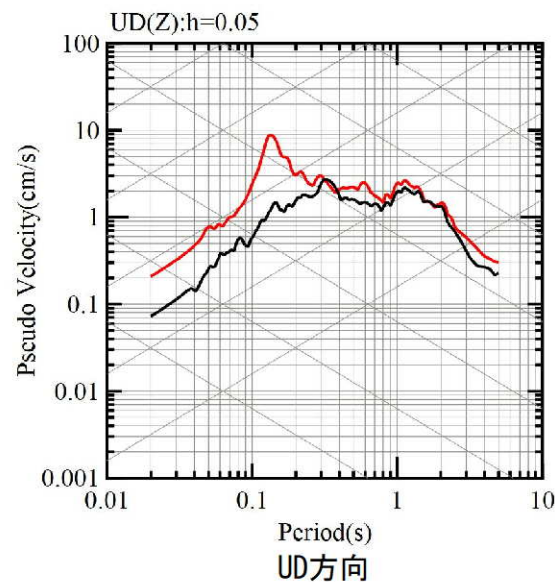
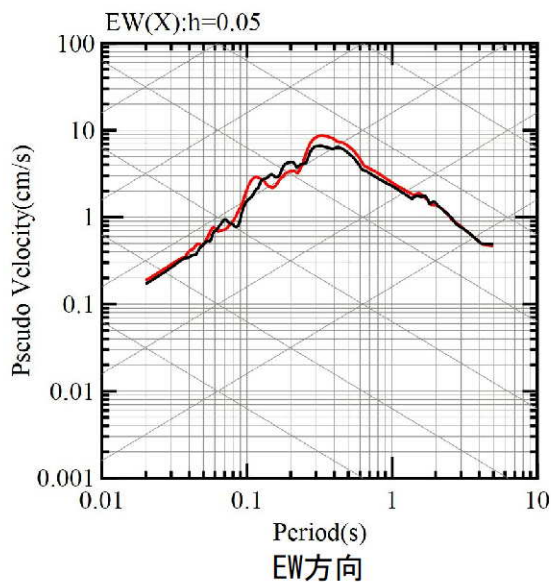
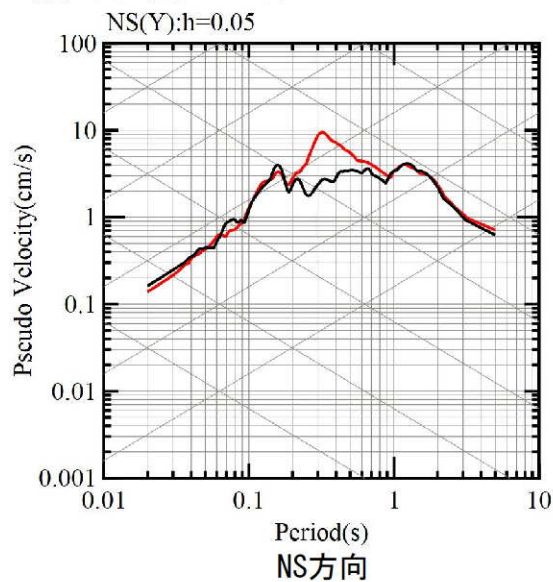
### ■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

#### ③ 鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



— 観測記録 EL.-18.5m  
— 応答波(Q=12.5)

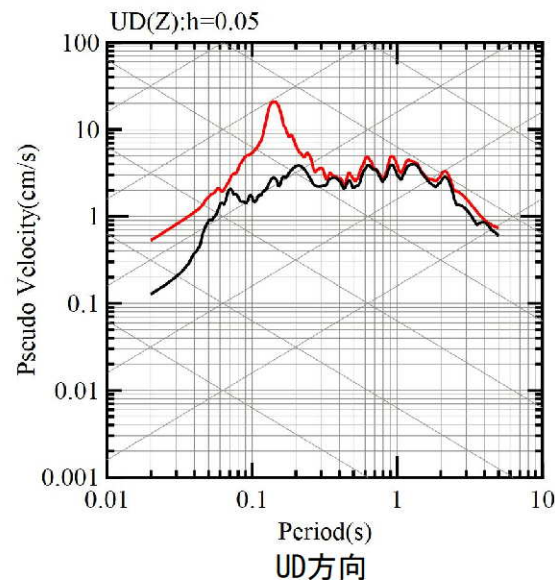
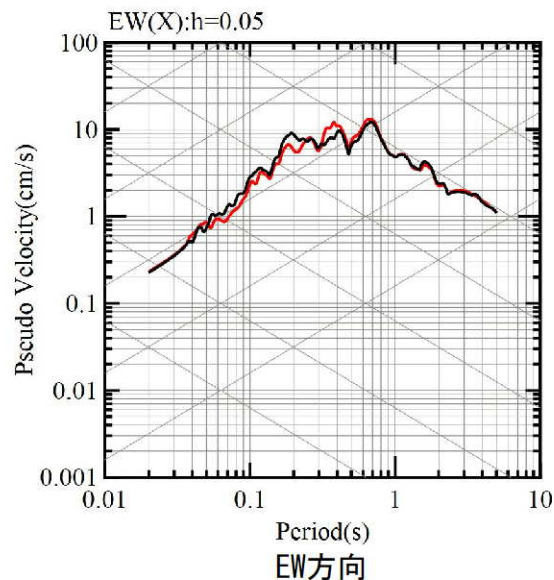
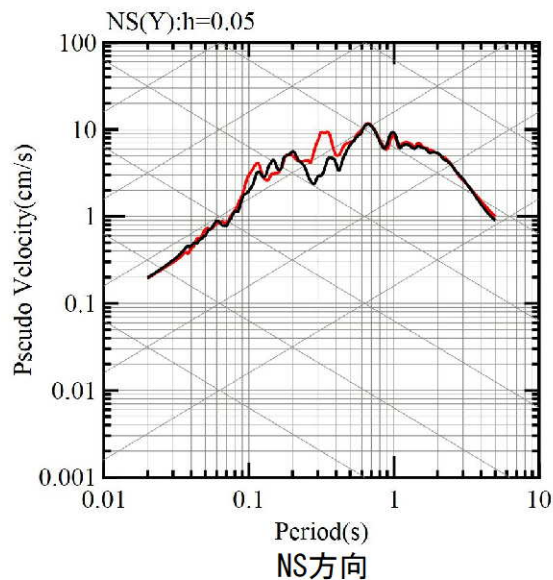
#### ④ 鹿児島県北西部



## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

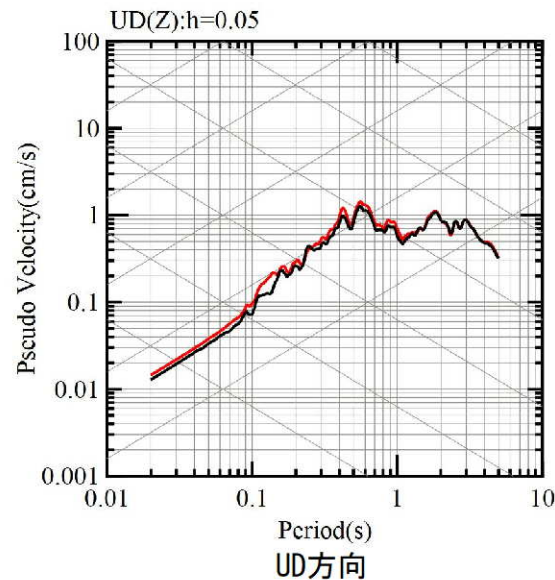
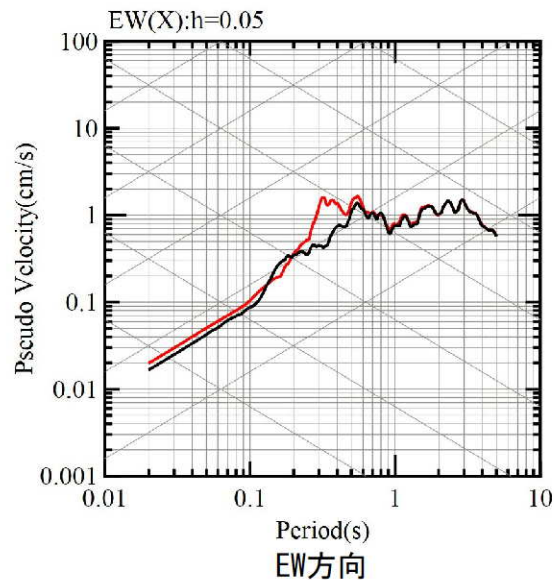
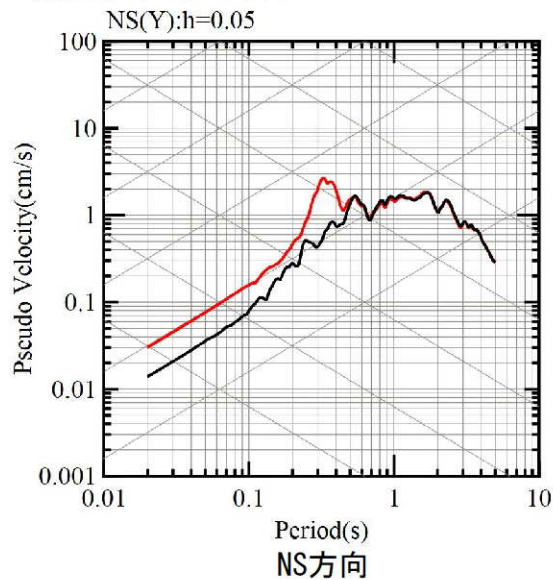
### ■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

#### ⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



— 観測記録 EL.-18.5m  
— 応答波(Q=12.5)

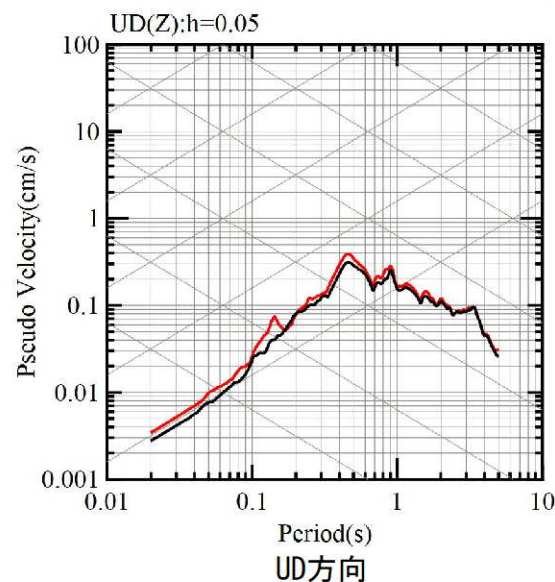
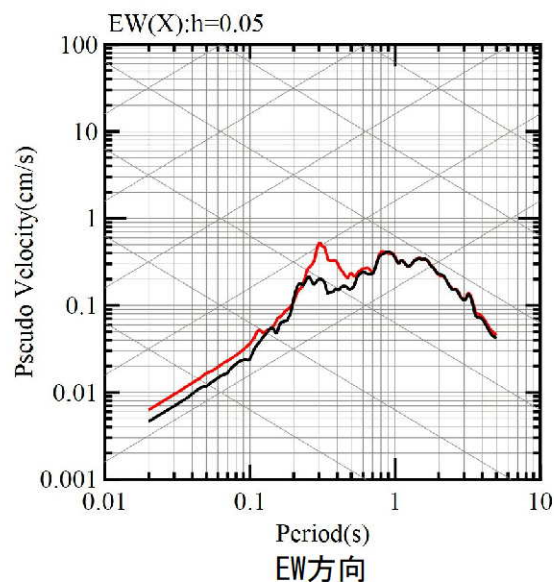
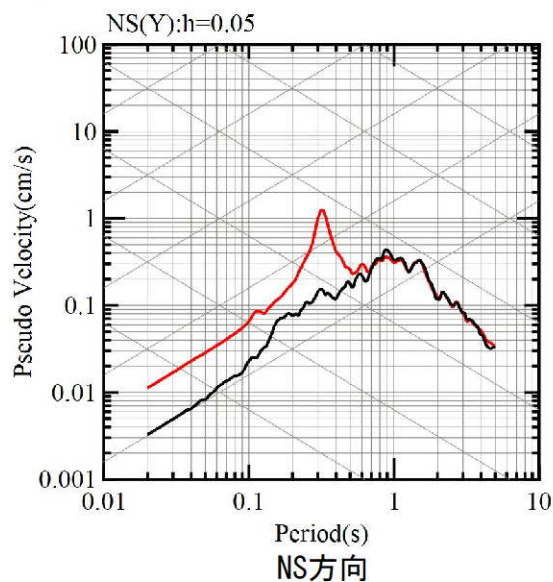
#### ⑥ 薩摩半島西方沖



## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

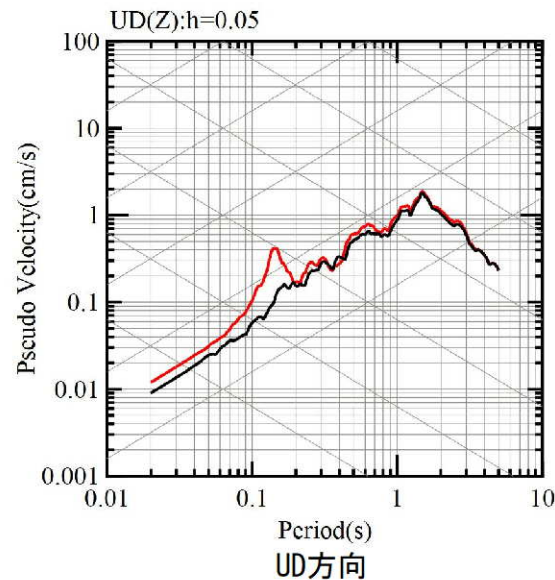
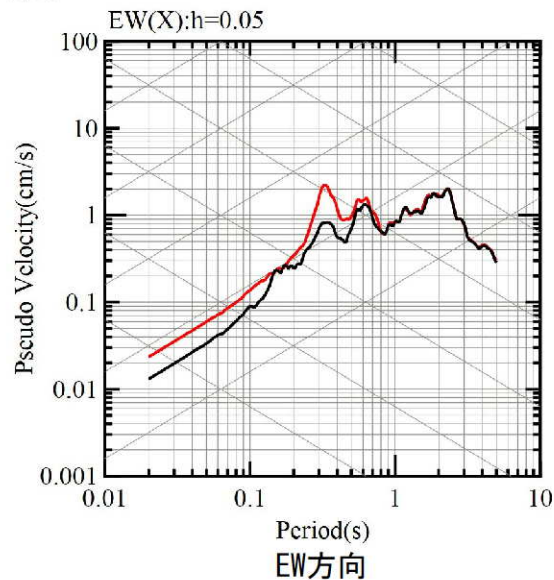
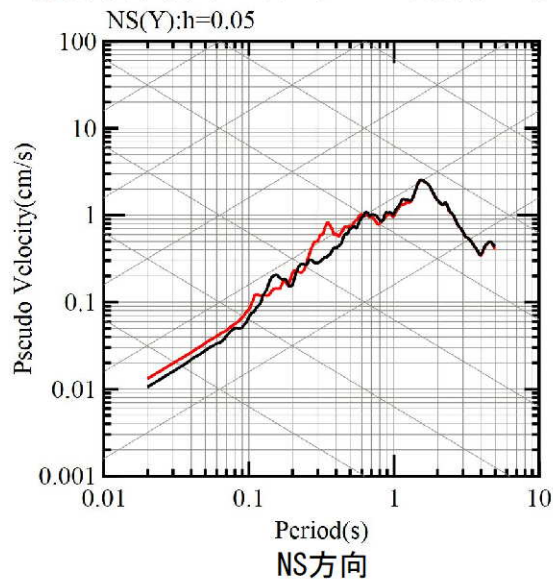
### ■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

#### ⑦ 薩摩半島西方沖



— 観測記録 EL.-18.5m  
— 応答波(Q=12.5)

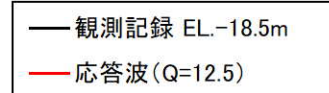
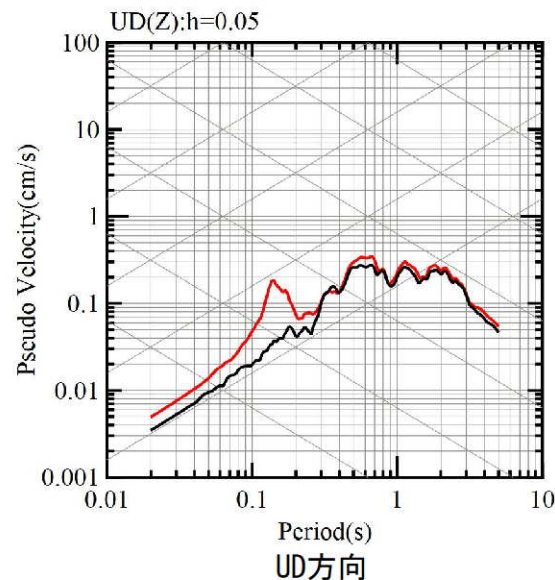
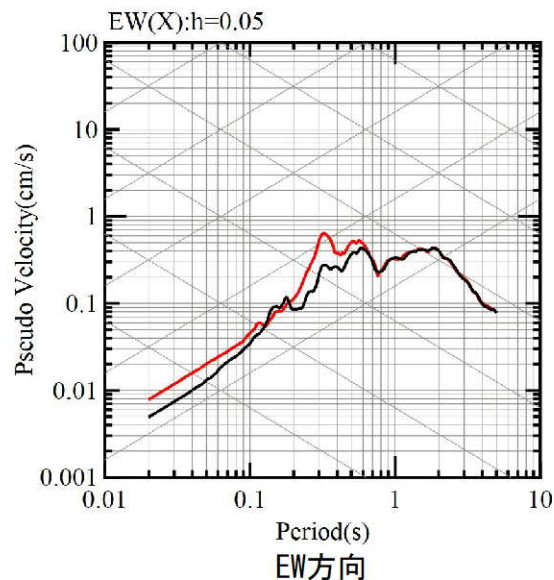
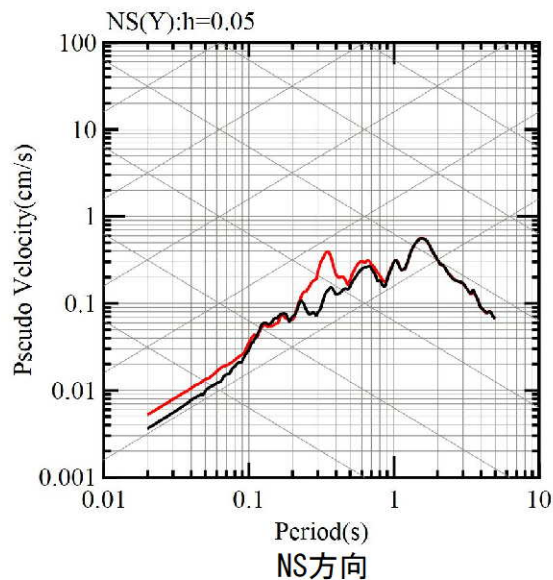
#### ⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



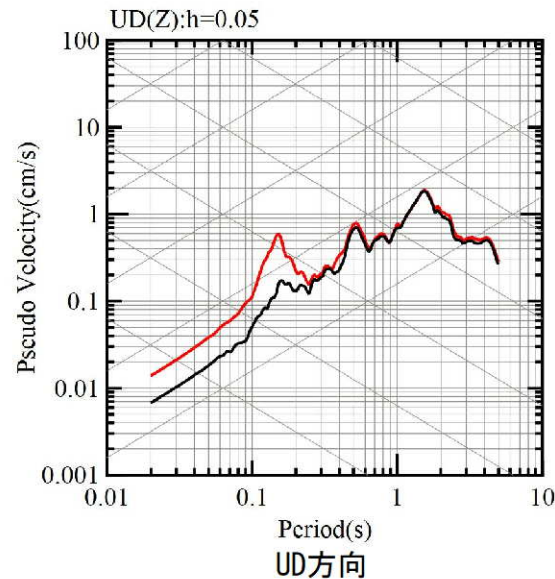
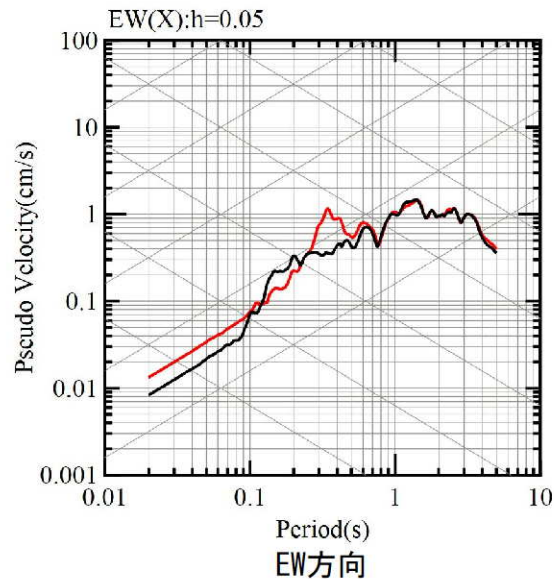
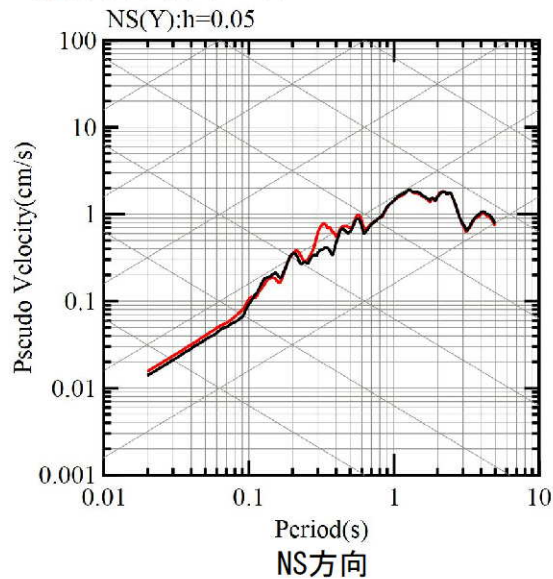
## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

#### ⑨ 熊本県熊本地方



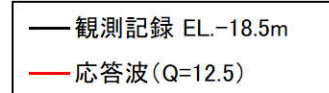
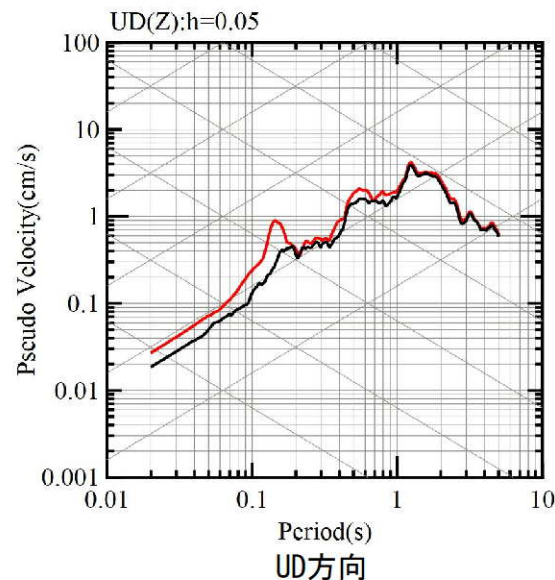
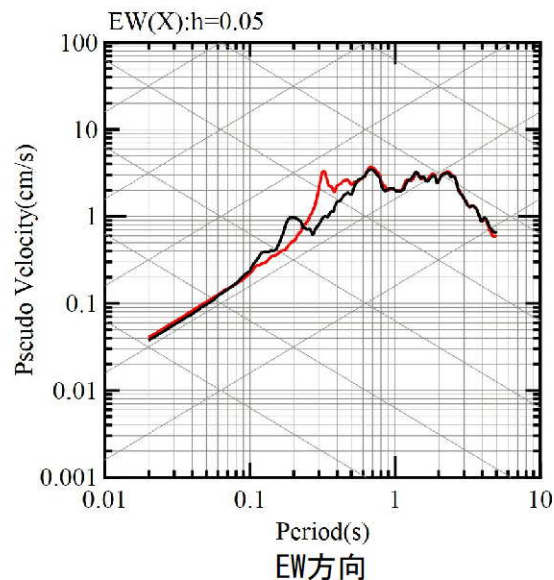
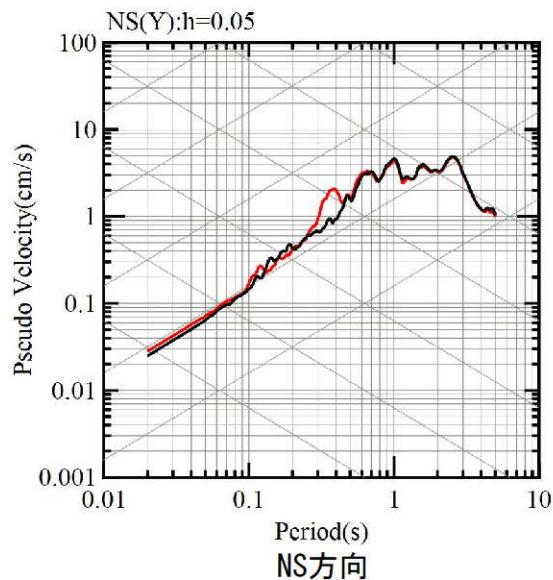
#### ⑩ 熊本県熊本地方



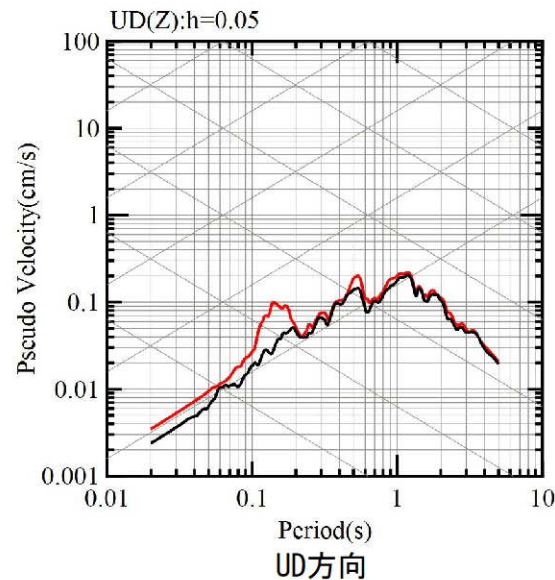
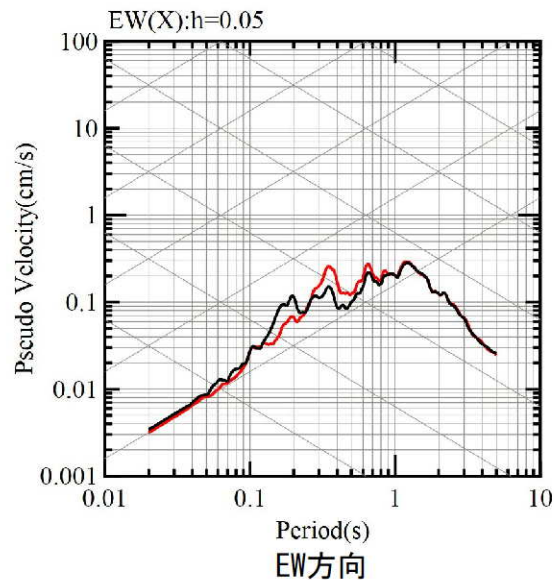
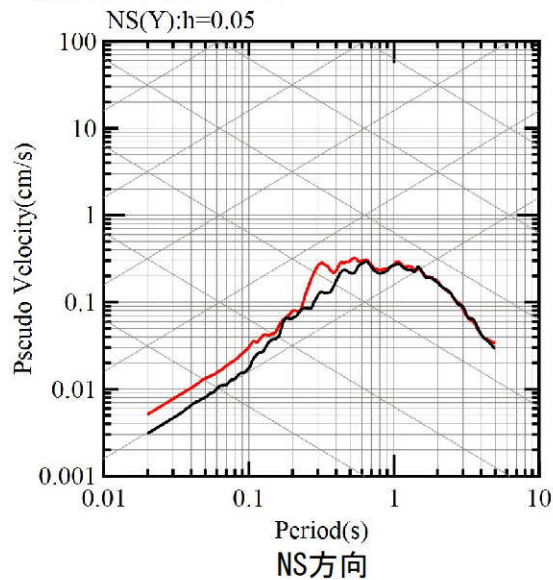
## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

#### ⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



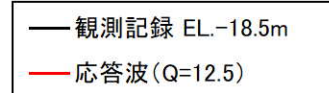
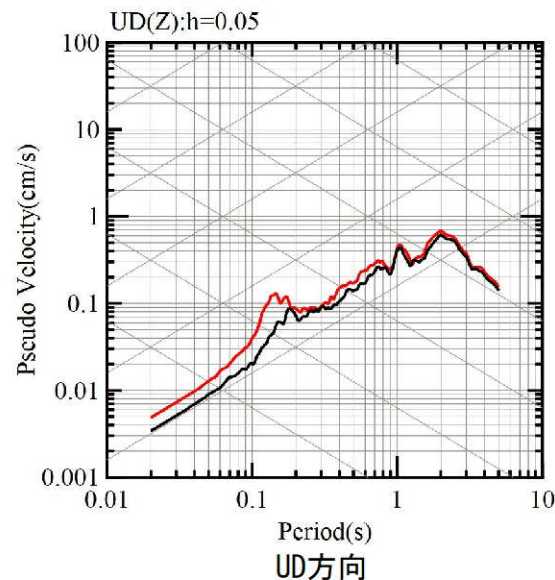
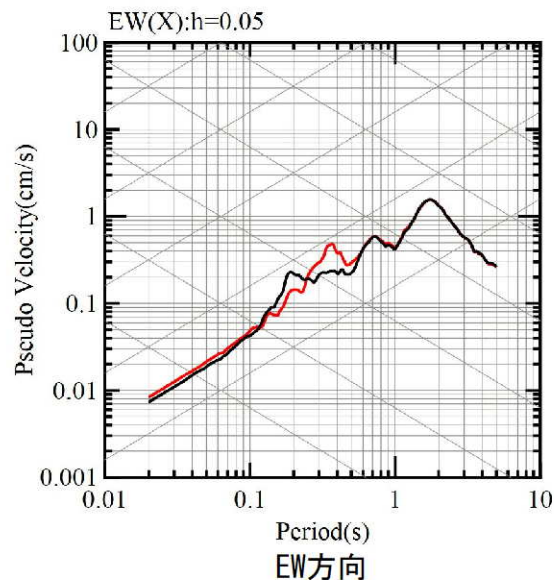
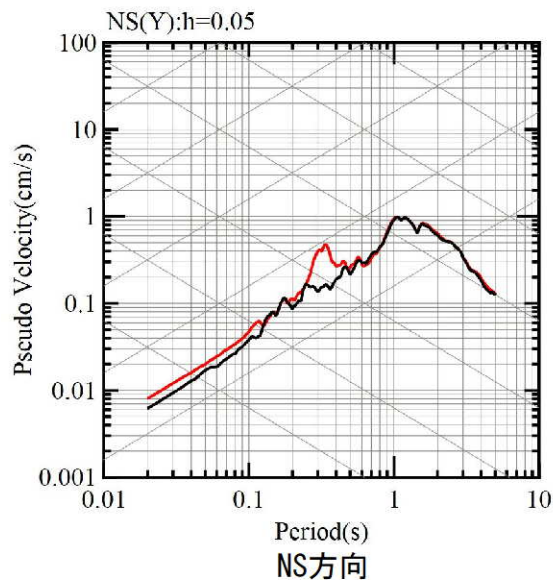
#### ⑫ 熊本県熊本地方



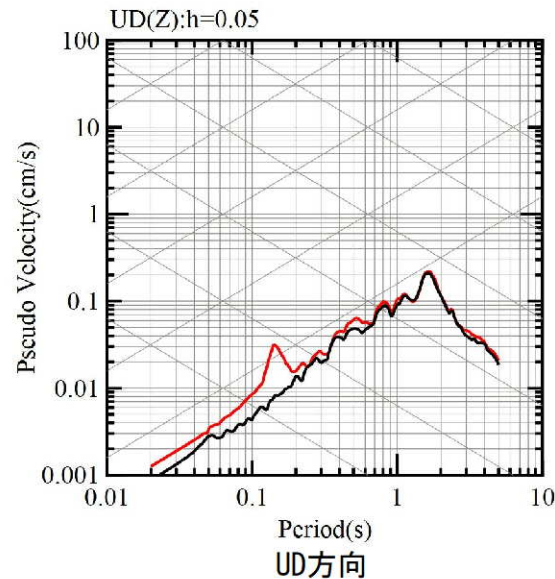
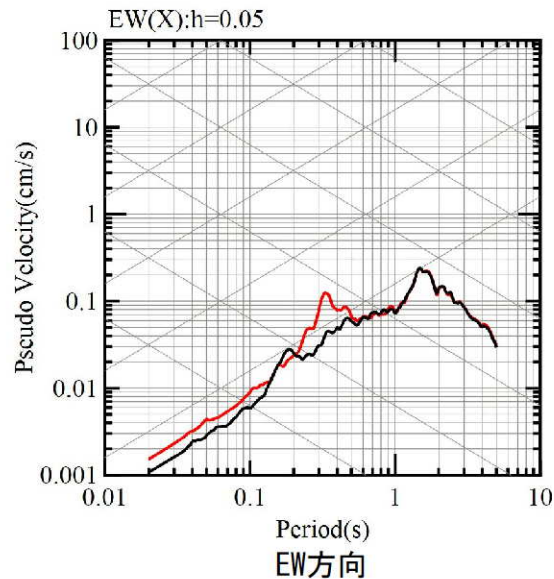
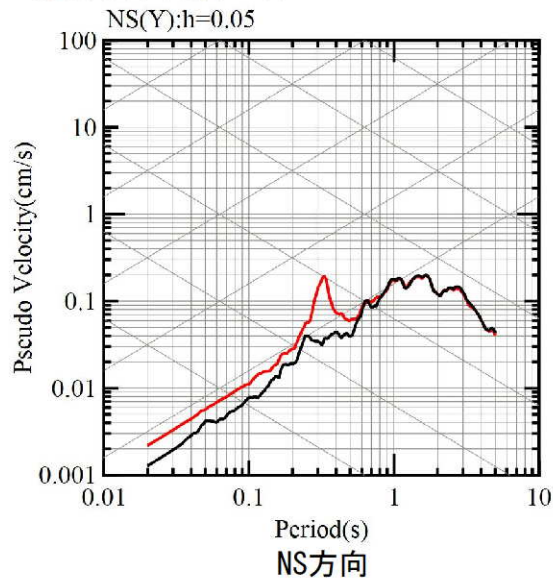
## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

#### ⑬ 熊本県熊本地方



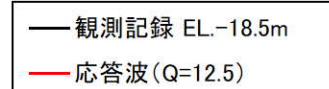
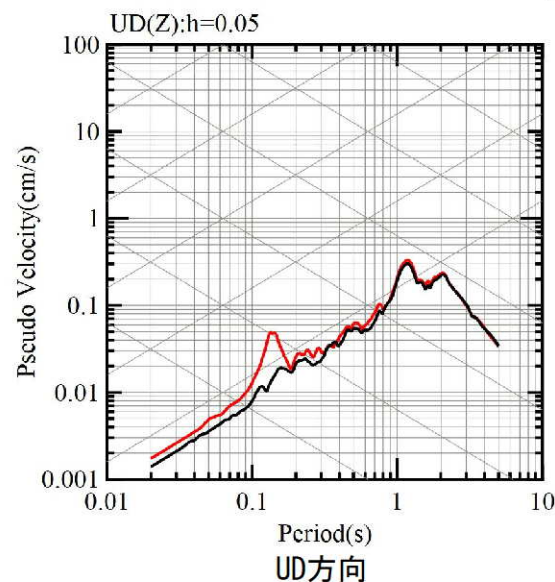
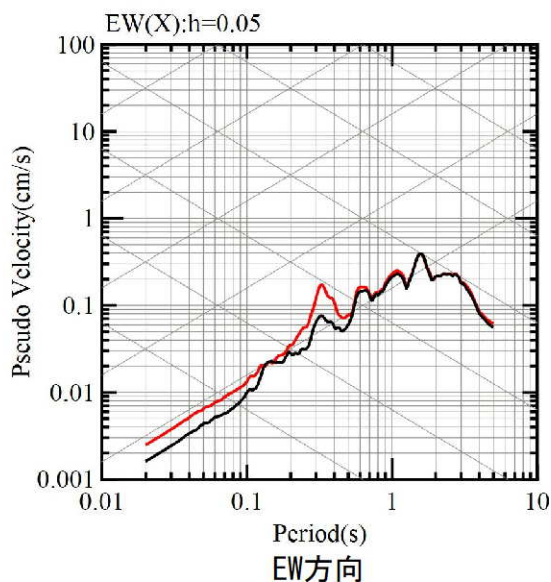
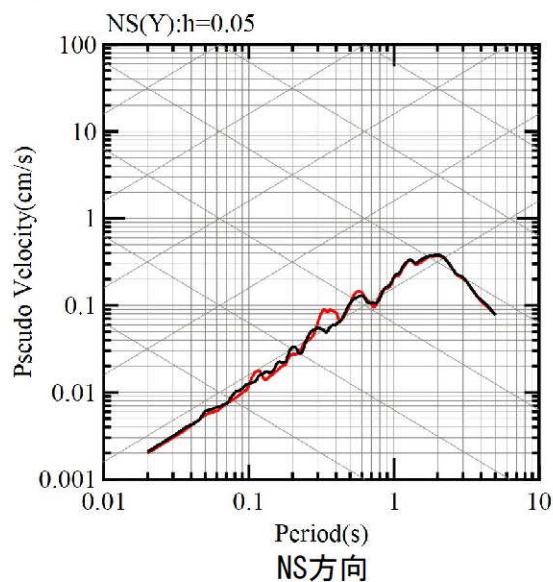
#### ⑭ 熊本県阿蘇地方



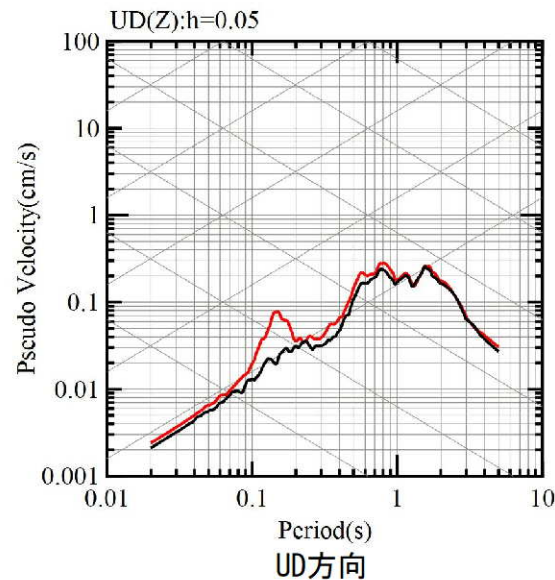
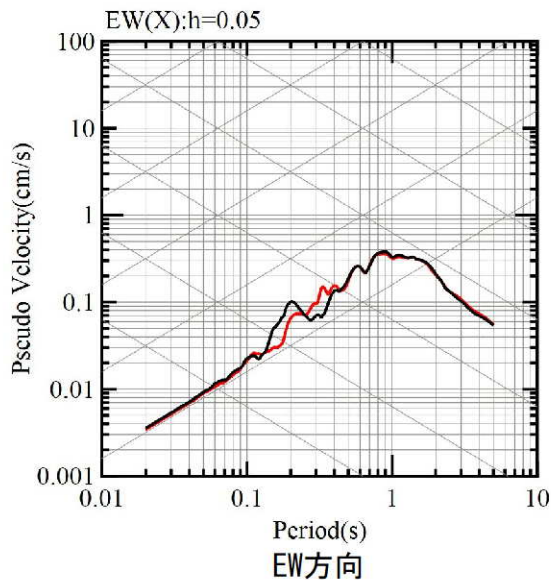
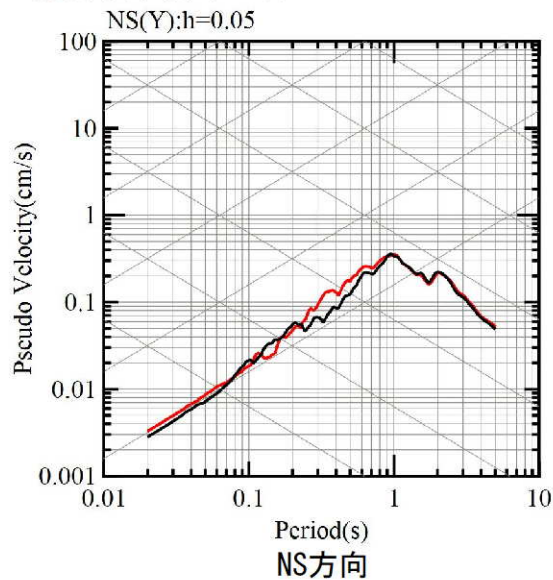
## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

#### ⑮ 熊本県阿蘇地方



#### ⑯ 熊本県熊本地方

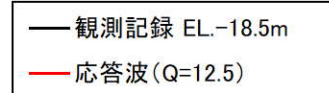
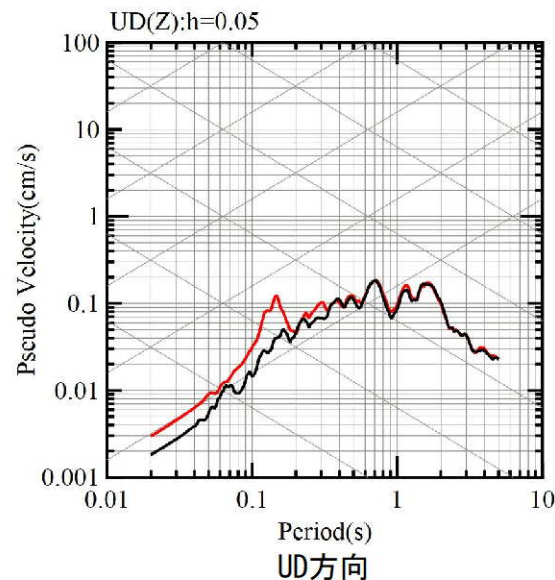
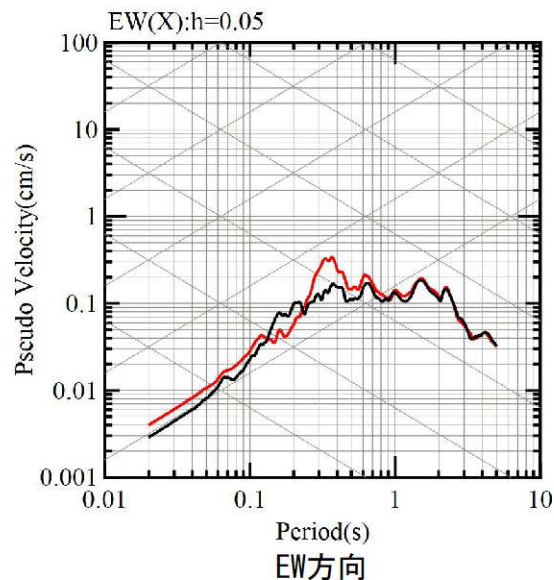
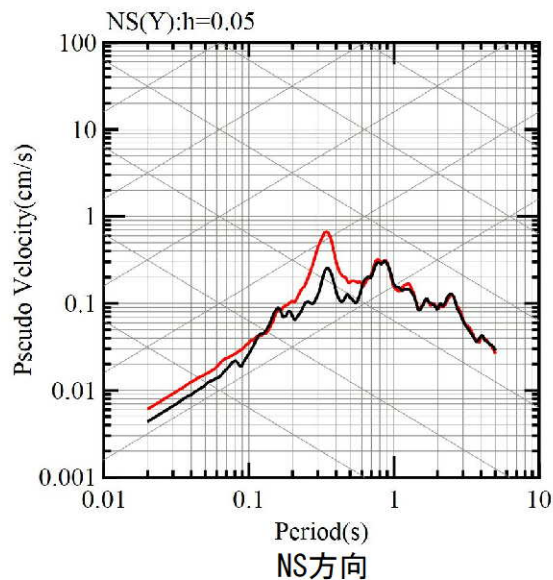




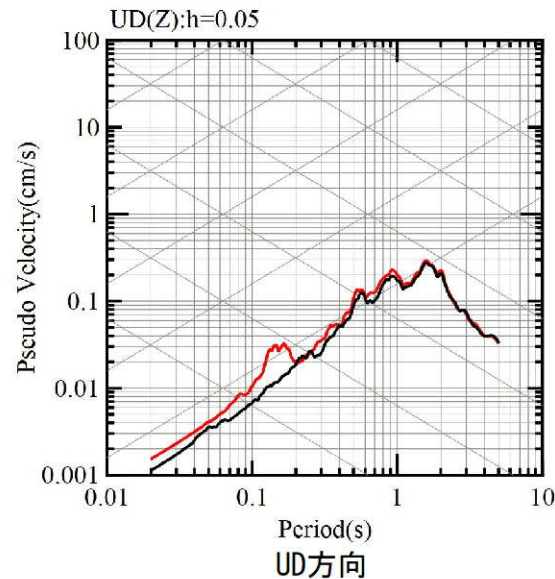
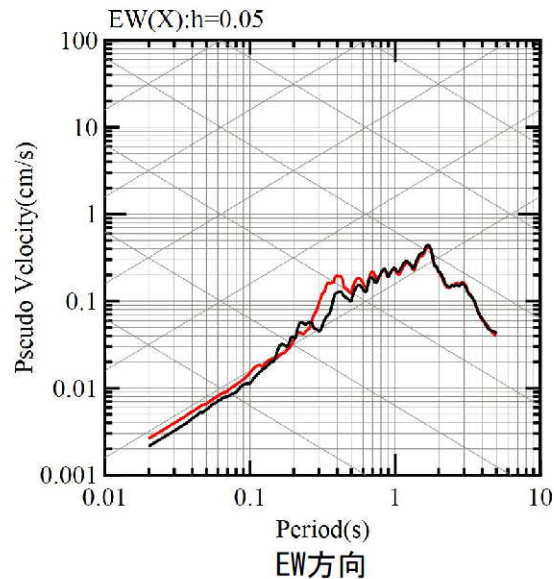
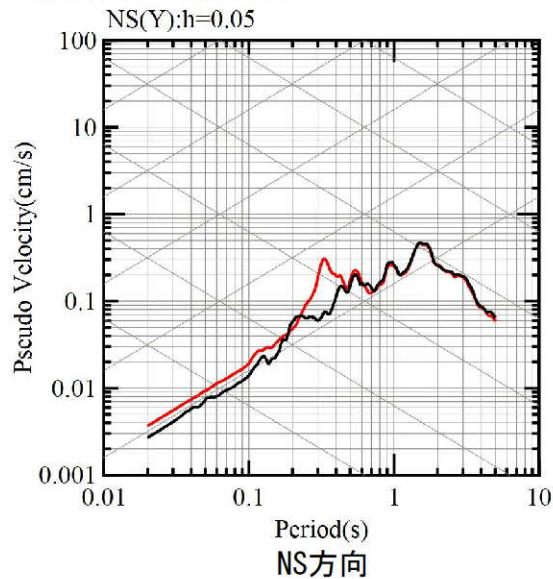
## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

#### ⑰ 熊本県熊本地方



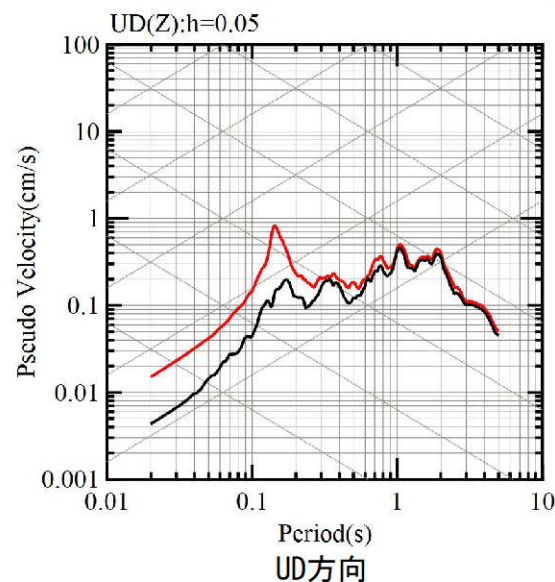
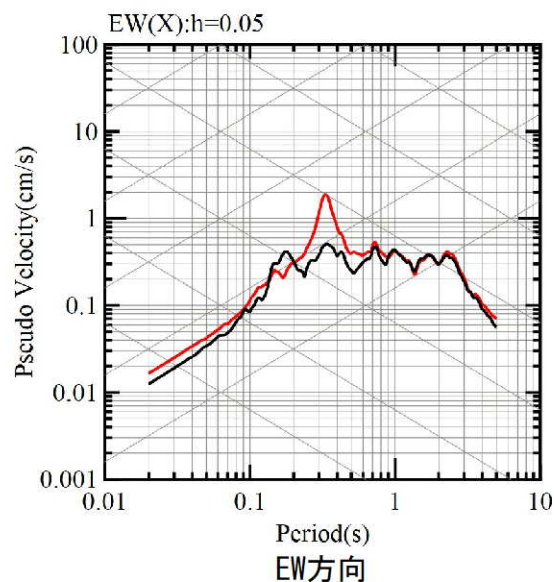
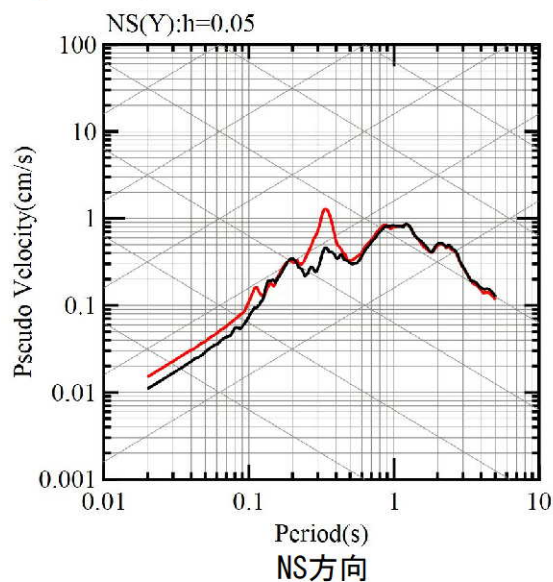
#### ⑱ 熊本県阿蘇地方



## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

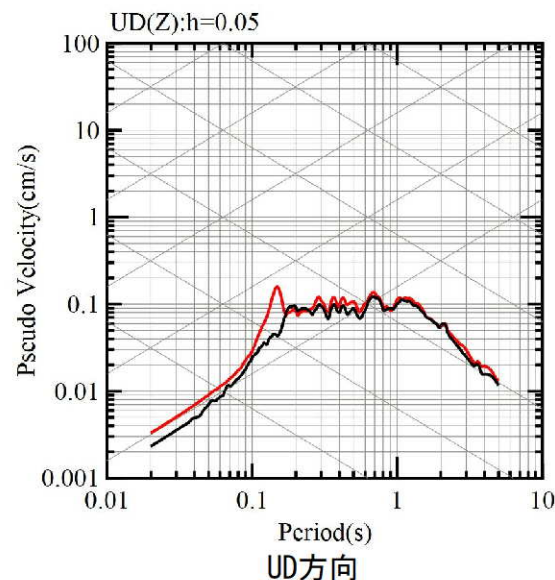
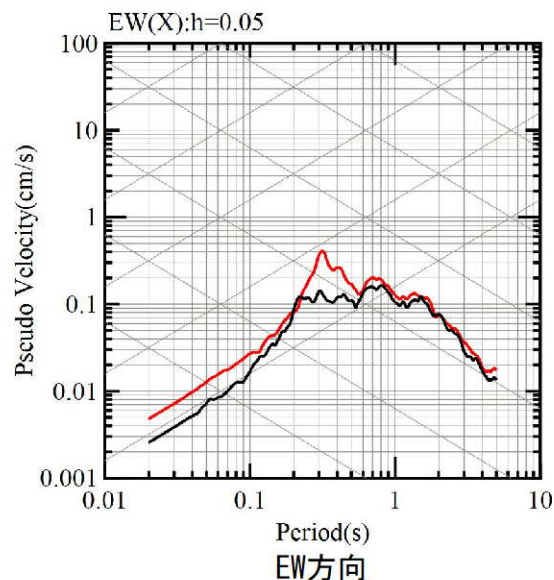
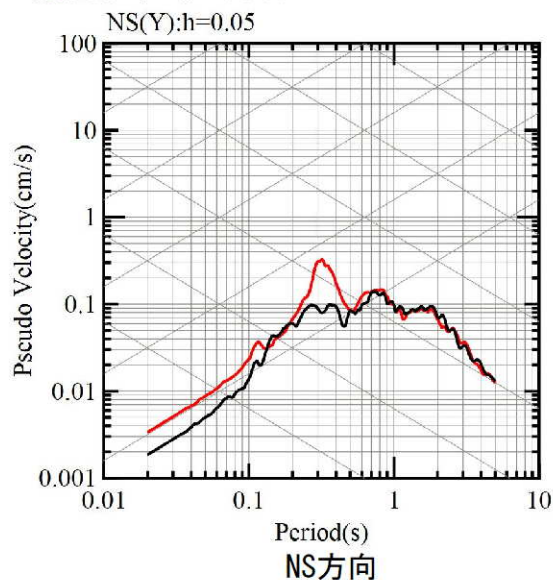
### ■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

#### ⑲ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL.-18.5m  
— 応答波(Q=12.5)

#### ⑳ 薩摩半島西方沖



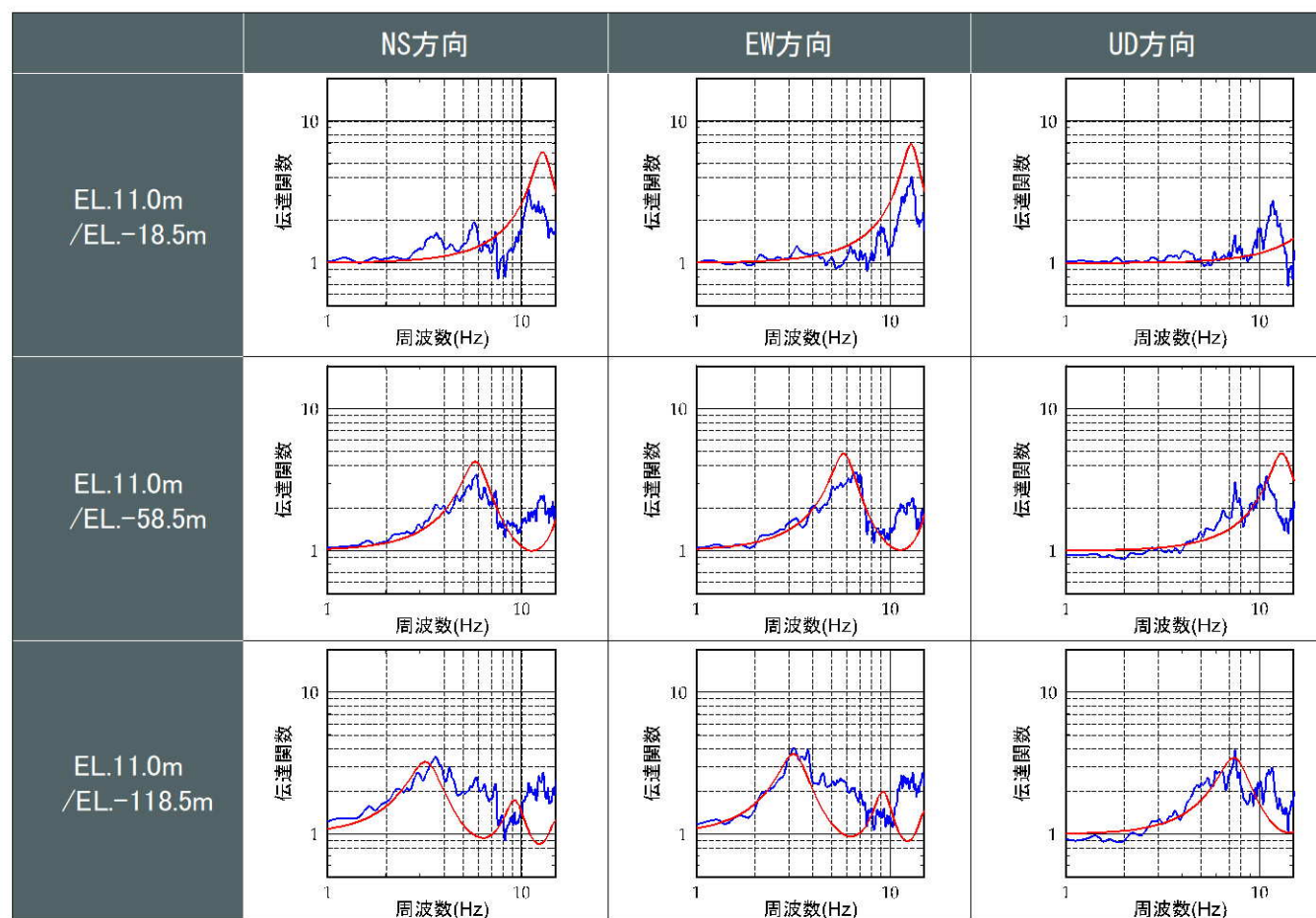
## 2.2 地震観測記録に見られる特徴的なピークの生成要因分析

### ■ 一部の周期帯における特徴的なピークの生成要因

- 地震観測記録の伝達関数と理論伝達関数の比較によると、特徴的なピークが見られる一部の周期帯において、EL. 11.0m/EL. -18.5mやEL. 11.0m/EL. -58.5mでは整合しているが、EL. 11.0m/EL. -118.5mでは整合しておらず、この特徴的なピークの要因は、EL. -58.5mからEL. -118.5mの範囲の速度構造にあると考えられる。

第1103回審査会合資料より抜粋

### ■ 地盤減衰 (Q値) の同定結果



— 地震観測記録(20地震)  
— 同定結果 ( $Q=Q_0 \cdot f^\alpha$ )

※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

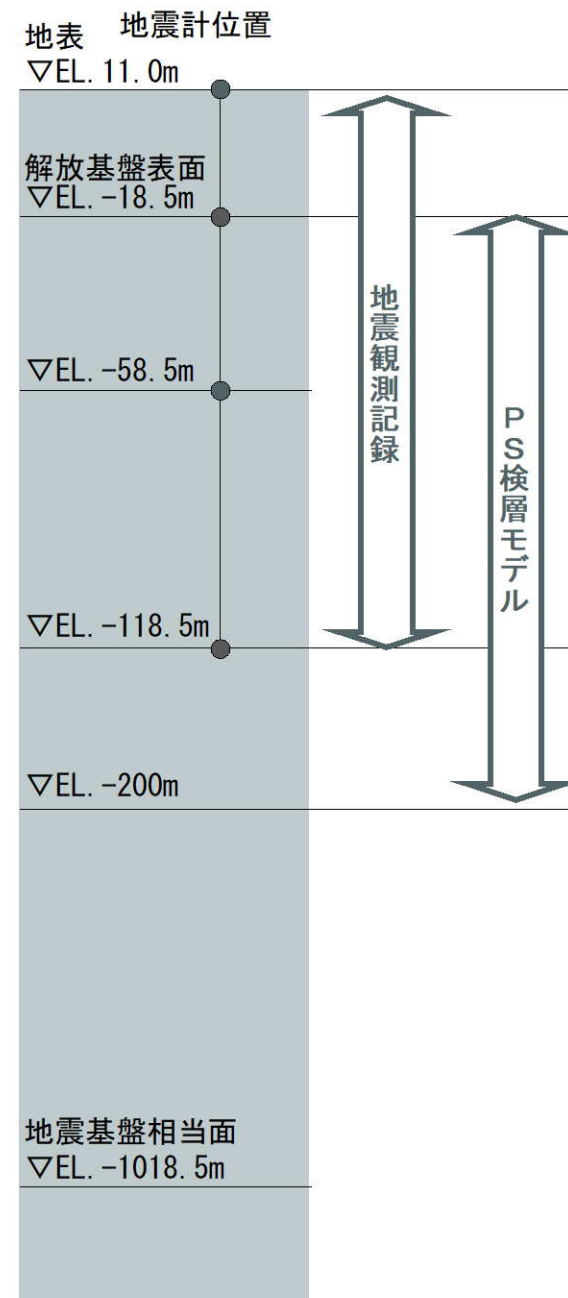
## 2.3 特徴的なピークの生成要因分析結果を踏まえた今後の対応方針

### ■ 地震観測記録等に見られるピークの生成要因

- PS検層モデルによる伝達関数に見られる特徴的なピーク（水平：0.1~0.2秒付近）は、速度構造のコントラストによるものと考えられる。
- 地震観測記録の伝達関数と理論伝達関数の比較から、地震観測記録に見られる特徴的なピークの要因は、EL. -58.5mからEL. -118.5mの範囲の速度構造にあると考えられる。
  - 地震観測記録の伝達関数と理論伝達関数の比較によると、特徴的なピークが見られる一部の周期帯において、EL. 11.0m/EL. -18.5mやEL. 11.0m/EL. -58.5mでは整合しているが、EL. 11.0m/EL. -118.5mでは整合していない。
- PS検層モデル及び地震観測記録ともに、速度構造に起因する特徴的なピークが生じており、設定した地下構造モデルは特徴的なピークが適切に評価できていないことを確認。

### ■ 今後の対応方針

- 地下構造モデルの再検討にあたり、速度構造は見直さず、地盤減衰（Q値）のみを見直す方針（第1103回審査会合にてご説明）。
- EL. -200m以浅の範囲の地盤減衰（Q値）の見直しでは、特徴的なピークをカバーできないため、地下構造モデル全体で観測記録をカバーする方針とする。
- 設定した地下構造モデル全体の妥当性を確認し、妥当でないと判断した場合には、地下構造モデルの見直しを検討する。



### 3. 地下構造モデルの再検討（方針）

# 3.1 地下構造モデルの妥当性確認に関する方針見直し

## ■ 地下構造モデルの検討・設定及び妥当性確認の流れ (当初の方針)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

### 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料3 2.2.1項 (1) (2)】

発電所敷地で取得した地震観測記録に基づき、解放基盤表面から最深部地震計 (EL. -118.5m) までの範囲の地盤減衰 (Q値) を、以下の手法で検討した結果、上限値は $Q=8.0$ 程度。

- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 ( $Q=7.6$ 程度)
- 伝達関数 (バイリニア型) による検討 ( $Q=5.8$ 程度)
- 地震波干渉法による検討 ( $Q=8.0$ 程度)

地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定。

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

### 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料3 2.2.2項 (1) (2)】

- 速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認。
- 発電所敷地で取得した地震観測記録に基づく地盤増幅率 (以下、「経験的地盤増幅率」と理論増幅率の残差が最小となる $Q=12.5$ の層下面深度を検討し、 $Q=12.5$ をEL. -200m以深まで適用できることを確認。

$Q=12.5$ の適用範囲は、保守的にEL. -200mまでに設定。

地下構造モデル

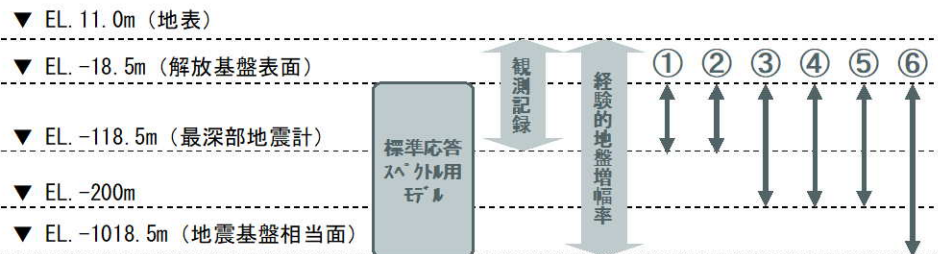
### 地下構造モデルの設定【第1103回審査会合 資料3 2.3節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ に設定。

※1: 震源車による人工震源を用いた減衰測定。振幅レベルや周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

※2: 岩石コア供試体を用いた超音波試験による減衰測定。岩盤の不均質性による減衰が含まれていない点や周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。

## 第1103回審査会合資料より抜粋 (一部修正)



### 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料3 2.2.1項 (3)】

$Q=12.5$ の妥当性を以下の観点で確認。

- $Q=12.5$ の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 (①)
- 卓越周波数において、 $Q=12.5$ による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する (②)

### 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料3 2.2.2項 (3)】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰 (Q値) とする妥当性を以下の観点で確認。

- ボーリング孔内測定による減衰※1 (③) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である
- 岩石コアを用いた測定による減衰※2 (④) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

### 地下構造モデルの妥当性確認【第1103回審査会合 資料3 2.4節】

設定した地下構造モデルの妥当性を以下の観点で確認。

- 設定した地下構造モデルの伝達特性 (伝達関数、応答スペクトル比) が、追加ボーリング調査結果※1を踏まえたPS検層モデルの伝達特性に対して同等もしくは上回る (⑤) [EL. -200m～解放基盤表面]
- 設定した地下構造モデルの地盤増幅率が、経験的地盤増幅率に対して同等もしくは上回る (⑥) [地震基盤相当面～解放基盤表面]

## 3.1 地下構造モデルの妥当性確認に関する方針見直し

### ■ 地下構造モデルの妥当性確認の方針見直し

- 地下構造モデルの妥当性について、27頁の通り、EL. -200m以浅の範囲の地盤減衰（Q値）の見直しでは、特徴的なピークをカバーできないため、地下構造モデル全体で観測記録をカバーする方針に見直し。
  - 地下構造モデル全体の妥当性を「ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認」により確認する方針に見直し。
    - 地震基盤相当面からの地震波の伝播特性が反映されている個別の地震観測記録と直接比較するため、個別の地震波により地下構造モデル全体の妥当性を確認するよう方針を見直し。
- (1) 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による確認
- 確認に用いる地震を選定し、友澤ほか（2021）<sup>1)</sup>によるブロックインバージョン結果の震源特性に伝播経路特性を乗じた地震基盤相当面における地震波を作成し、地下構造モデルを用いて一次元波動論により応答波を算出。
  - 算出した応答波と地震観測記録との比較により地下構造モデル全体の妥当性を確認。
- (2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波による確認
- 網羅性の観点から、20地震の観測記録を用いて、友澤ほか（2021）によるブロックインバージョン結果の地盤増幅特性により引き戻した地震基盤相当面における地震波を作成し、地下構造モデルを用いて一次元波動論により応答波を算出。
  - 算出した応答波と地震観測記録との比較により地下構造モデル全体の妥当性を確認。

# 3.1 地下構造モデルの妥当性確認に関する方針見直し

## ■ 地下構造モデルの検討・設定及び妥当性確認の流れ (見直し後の方針)

最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値)

### 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料3 2.2.1項 (1) (2)】

発電所敷地で取得した地震観測記録に基づき、解放基盤表面から最深部地震計 (EL. -118.5m) までの範囲の地盤減衰 (Q値) を、以下の手法で検討した結果、上限値は $Q=8.0$ 程度。

- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 ( $Q=7.6$ 程度)
- 伝達関数 (バイリニア型) による検討 ( $Q=5.8$ 程度)
- 地震波干渉法による検討 ( $Q=8.0$ 程度)

地盤減衰 (Q値) は、保守的に $Q=12.5$ と設定。

最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値)

### 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の検討・設定 【第1103回審査会合 資料3 2.2.2項 (1) (2)】

- 速度層断面により、解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲は概ね同じ速度層に分類されることを確認。
- 発電所敷地で取得した地震観測記録に基づく地盤増幅率 (以下、「経験的地盤増幅率」と理論増幅率の残差が最小となる $Q=12.5$ の層下面深度を検討し、 $Q=12.5$ をEL. -200m以深まで適用できることを確認。

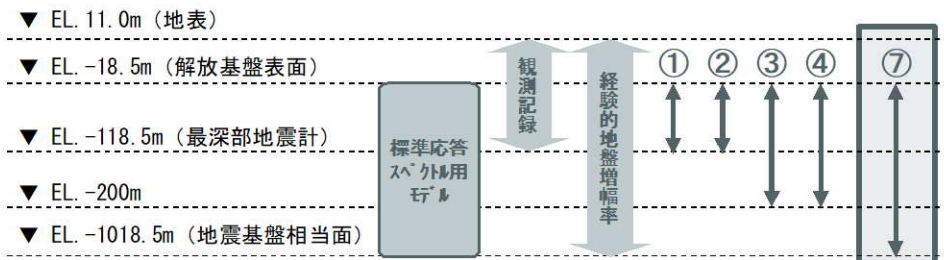
$Q=12.5$ の適用範囲は、保守的にEL. -200mまでに設定。

地下構造モデル

### 地下構造モデルの設定 【第1103回審査会合 資料3 2.3節】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲における地盤減衰 (Q値) を $Q=12.5$ に設定。

- ※1: 震源車による人工震源を用いた減衰測定。振幅レベルや周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。
- ※2: 岩石コア供試体を用いた超音波試験による減衰測定。岩盤の不均質性による減衰が含まれていない点や周波数特性における自然地震との違いに留意した検討及び分析を実施。



### 最深部地震計以浅の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料3 2.2.1項 (3)】

$Q=12.5$ の妥当性を以下の観点で確認。

- $Q=12.5$ の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 (①)
- 卓越周波数において、 $Q=12.5$ による理論伝達関数の方が、同定結果による理論伝達関数より大きなピークを有する (②)

### 最深部地震計以深の地盤減衰 (Q値) の妥当性確認 【第1103回審査会合 資料3 2.2.2項 (3)】

解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲において、同一の地盤減衰 (Q値) とする妥当性を以下の観点で確認。

- ボーリング孔内測定による減衰※1 (③) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である
- 岩石コアを用いた測定による減衰※2 (④) が、最深部地震計以浅と最深部地震計以深で同等である

### 地下構造モデルの妥当性確認

設定した地下構造モデルの妥当性を以下の観点で確認。

- ブロックインバージョン結果を用いた地震波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 (⑦) [地震基盤相当面～解放基盤表面]

☐ : 方針見直し箇所



## 3.1 地下構造モデルの妥当性確認に関する方針見直し

### ■ 地下構造モデル

- 以下の地下構造モデルの妥当性を確認する。

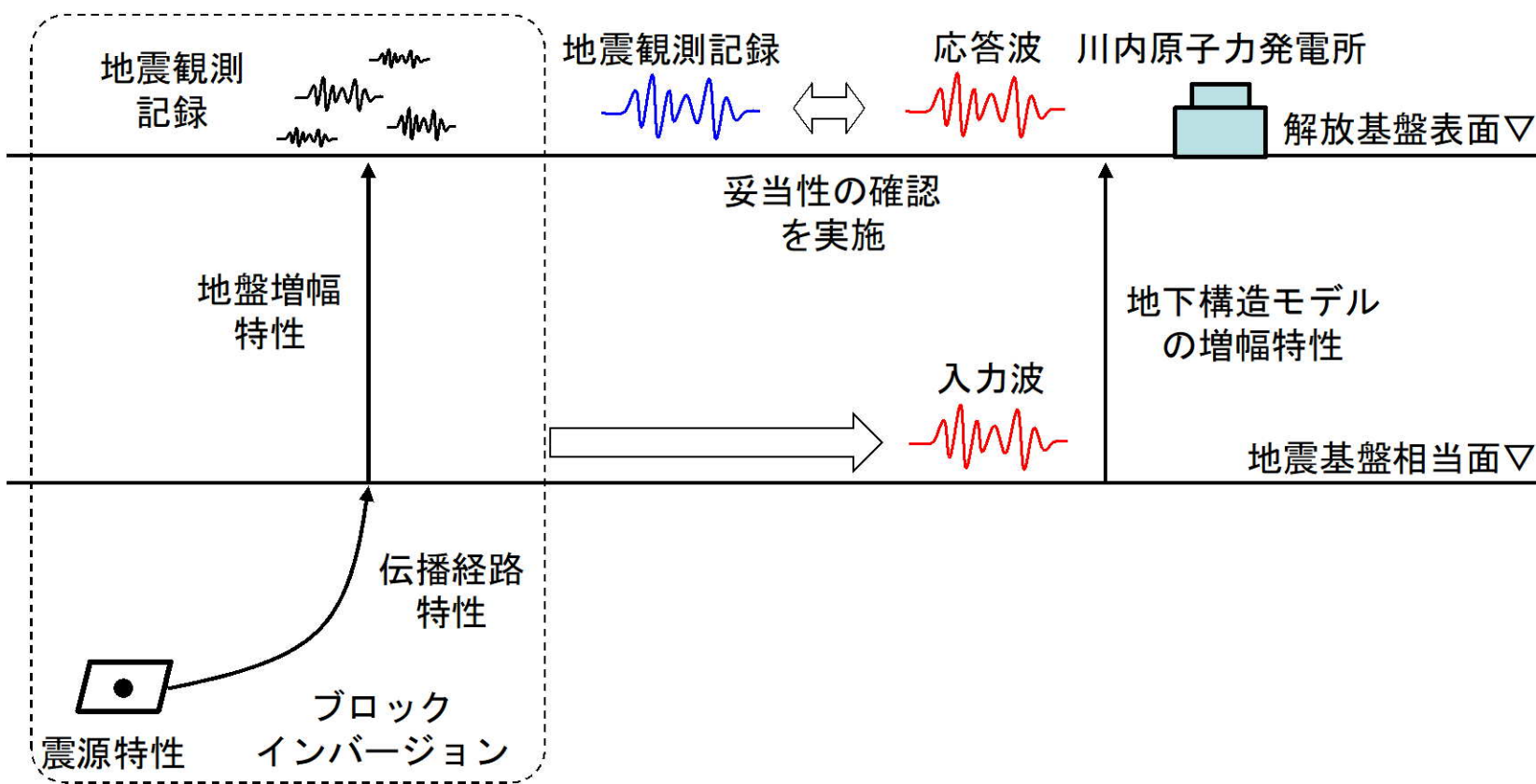
見直し前の標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデル

EL.	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	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200

## 3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）

### ■ ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

- 地震基盤相当面からの地震波の伝播特性が反映されている個別の地震観測記録と直接比較するため、個別の地震波により地下構造モデル全体の妥当性を確認する。
- 地震基盤相当面における地震波の作成では、友澤ほか(2021)によるブロックインバージョンで適切に分離された震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性【参考資料①】を用いる。
- 作成した地震波（水平・上下）により、地下構造モデルを用いて一次元波動論に基づき算出した応答波と地震観測記録との比較により地下構造モデル全体の妥当性を確認する。



ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認のイメージ

地下構造モデル (現行)	地下構造モデル	
	Vs	Q値
解放基盤表面 ▽EL. -18.5m		
▽EL. -28.5m	1500	12.5
	1600	12.5
▽EL. -200m		
	1600	100
▽EL. -480m		
地震基盤相当面 ▽EL. -1018.5m	2150	200
	3010	200

## 3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）

### ■ ブロックインバージョン結果を用いた地震波作成

- ・ 地下構造モデル全体の妥当性確認に用いる地震波は、以下の(1)、(2)に基づき作成する。
- ・ ブロックインバージョンは、観測記録に対する、震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性を掛け合わせた計算結果の残差が最小となるよう、3つの特性を分離する手法であり、個別の観測記録との残差が存在する。これを踏まえ、(1)に加え(2)に基づき地震波を作成する。【参考資料②参照】

#### (1) 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波【35～36頁参照】

- － 個別の震源特性を用いるため、ブロックインバージョンで検討されている地震にしか適用できない。
- － 震源特性に伝播経路特性を乗じるため、破壊伝播効果などの残差は含まれない。
- － 残差の大小関係により、作成した地震波が過小もしくは過大評価されるため、更に、対象とした20地震から、残差が1.0に近い適切な地震を選定する。

#### (2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波【37～38頁参照】

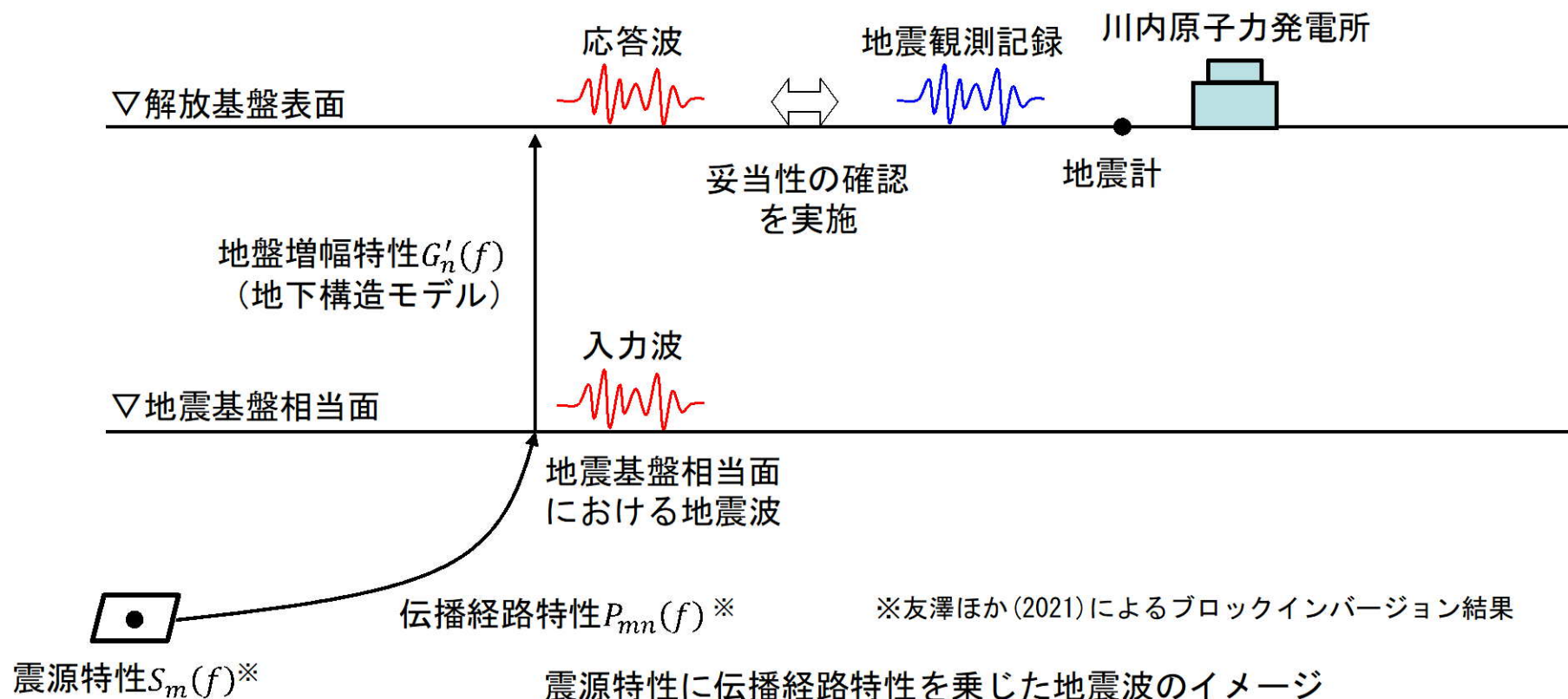
- － どの地震に対しても1つの地盤増幅特性を用いるため、観測記録があれば、どの地震でも適用できる。
- － 観測記録を地盤増幅特性を用いるため、破壊伝播効果などの残差が含まれる。
- － 20地震全てを対象とする。

## 3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）

### （1）震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認

- 友澤ほか(2021)<sup>1)</sup>によるブロックインバージョン結果における震源特性に伝播経路特性を乗じて、地震基盤相当面における地震波を作成。
- 作成した地震波を地震基盤相当面に入力し、地下構造モデルを用いて次元波動論により応答波を算出。
- 算出した応答波と地震観測記録を比較して、地下構造モデル全体の妥当性の確認を実施。
- 算出した応答波のフーリエ振幅スペクトル $C_{mn}(f)$ は下式の通りであり、残差 $E_{mn}(f)$ が含まれない。

$$C_{mn}(f) = S_m(f)P_{mn}(f)G'_n(f) \quad \text{※}m\text{は地震に対する添え字、}n\text{は観測点に関する添え字}$$



## 3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）

### ■ 妥当性確認方針

- 本方法で用いる震源特性は、ブロックインバージョンの検討対象地震の震源特性を用いるため、地震観測記録の応答スペクトルによる確認において対象とした20地震のうち15地震を対象とする。
- 本方法では、作成する地震波が過小もしくは過大評価にならないよう、更に上記15地震から残差が1.0に近い地震を選定する。
- 選定した地震について作成した地震基盤相当面の地震波を用いた応答波が観測記録と同等もしくは上回ることにより妥当性を確認する。（次回提示）
- なお、15地震を対象とした妥当性の確認状況については参考資料③参照

地震観測記録の応答スペクトルによる確認において対象とした地震のうちブロックインバージョンの検討に用いた地震諸元（計15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

## 3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）

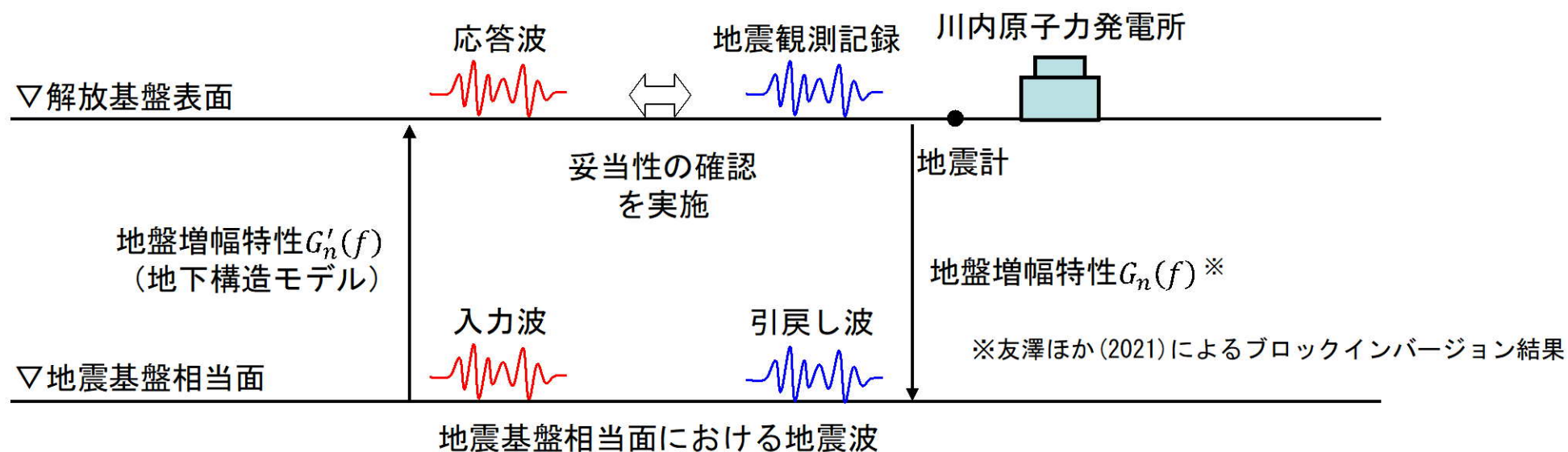
### （2）地盤増幅特性により引き戻した地震波

- 地震観測記録（地表）を、友澤ほか(2021)<sup>1)</sup>によるブロックインバージョン結果における地盤増幅特性で除して、地震基盤相当面における地震波を作成。
- 作成した地震波を地震基盤相当面に入力し、地下構造モデルを用いて次元波動論により応答波を算出。
- 算出した応答波と地震観測記録を比較して、地下構造モデル全体の妥当性の確認を実施。
- 算出した応答波のフーリエ振幅スペクトル $C'_{mn}(f)$ は下式の通りであり、残差 $E_{mn}(f)$ が含まれる。

$$C'_{mn}(f) = \frac{O_{mn}(f)}{G_n(f)} * G'_n(f) = \frac{F_{mn}(f)E_{mn}(f)}{G_n(f)} * G'_n(f) = \frac{S_m(f)P_{mn}(f)G_n(f)E_{mn}(f)}{G_n(f)} * G'_n(f)$$

$$= S_m(f)P_{mn}(f)G'_n(f)E_{mn}(f)$$

※ $m$ は地震に対する添え字、 $n$ は観測点に関する添え字



経験的地盤増幅率により引き戻した地震波のイメージ

## 3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）

### ■ 妥当性確認方針

- 本方法では、どの地震に対しても1つの地盤増幅特性を用いることから、観測記録があれば地震波の作成は可能であるため、網羅性の観点から、地震観測記録の応答スペクトルによる確認において対象とした20地震を対象とする。
- 本方法では、残差が含まれるため、破壊伝播効果などの影響が含まれるが、地盤増幅特性は平均的な特性であるため、作成した地震基盤相当面の地震波を用いた応答波が観測記録を上回ることにより妥当性を確認する。（次回提示）
- なお、20地震を対象とした妥当性の確認状況については参考資料④参照

妥当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

#### 4. 地下構造モデルの設定（方針）



## 4. 地下構造モデルの設定（方針）

### ■ 地盤減衰（Q値）の見直し方針

- 地下構造モデル全体の妥当性は、「3.2 地下構造モデル全体の妥当性確認（方針）」にて確認。
- 以下を踏まえ、EL. -58.5mからEL. -200mの範囲において、更に余裕を持たせた地盤減衰（Q値）に見直す。
  - EL. -58.5mからEL. -118.5mの範囲では、特徴的なピークをカバーできていない。
  - 解放基盤表面からEL. -118.5mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、地震観測記録の検討に基づき、保守的に設定。一方、EL. -118.5mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、既存の速度層断面及び経験的地盤増幅率を用いた確認によりEL. -118.5m以浅と同等の地盤減衰（Q値）を設定し、ボーリング孔内における減衰測定等により妥当性を確認しており、EL. -118.5mからEL. -200mの範囲の地盤減衰（Q値）は、地震観測記録による直接的な設定でない。

地盤減衰（Q値）		
地表 ▼ EL. 11.0m 解放基盤表面 ▼ EL. -18.5m 最深部地震計 ▼ EL. -118.5m ▼ EL. -200m ▼ EL. -1018.5m	地震観測記録 速度層断面・ボーリング孔内減衰測定等	地震観測記録を用いた以下の検討結果に基づき、保守的に設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>伝達関数（周波数依存型）による検討</li> <li>伝達関数（バイリニア型）による検討</li> <li>地震波干渉法による検討</li> </ul> 以下の確認に基づき、EL. -118.5m以浅と同等に設定 <ul style="list-style-type: none"> <li>速度層断面による確認</li> <li>経験的地盤増幅率を用いた確認</li> </ul> 以下の確認に基づき、妥当性を確認 <ul style="list-style-type: none"> <li>ボーリング孔内減衰測定による確認</li> <li>岩石コア減衰測定による確認</li> </ul> 慣用値（ $V_s/15 \sim 10$ ）を基に設定（既許可モデルと同様）

## 4. 地下構造モデルの設定（方針）

### ■ 標準応答スペクトル用モデルの見直し方針

- 前頁を踏まえ、EL. -58.5mからEL. -200mの範囲において、全体の妥当性を確認した地下構造モデルに、更に余裕を持たせた地盤減衰（Q値）に見直す方針とする。

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用モデル）

（見直し前）

（見直し検討）

EL.	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	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	0.0	2.70	1500	3200	12.5	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m										
-58.5m	-0.01	2.70	1600	3700	12.5	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m										
	-0.04	2.70	1600	3700	12.5	-0.04	2.70	1600	3700	12.5
-480m	-0.182	2.70	1600	3700	100	-0.182	2.70	1600	3700	100
-1018.5m										
	-0.462	2.70	2150	4400	200	-0.462	2.70	2150	4400	200
	-1.0	2.70	3010	5200	200	-1.0	2.70	3010	5200	200

: 見直し範囲

参考資料① 友澤ほか(2021)のブロックインバージョン結果の確認

# 参考資料① 友澤ほか(2021)のブロックインバージョン結果の確認

## (1) 伝播経路特性 $P_{mn}(f)$

- 伝播経路特性の不均質減衰構造の推定結果によると、鹿児島県の霧島山、桜島、開聞岳周辺、大分県の九重山、湯布院周辺、長崎県の西方で周辺よりも相対的に減衰が大きい領域が推定。
- 1997年鹿児島県北西部地震、2005年福岡県西方沖地震、2016年熊本地震の周辺で個別に検討された既往研究によるQ値と大きく乖離しないことが確認されている。

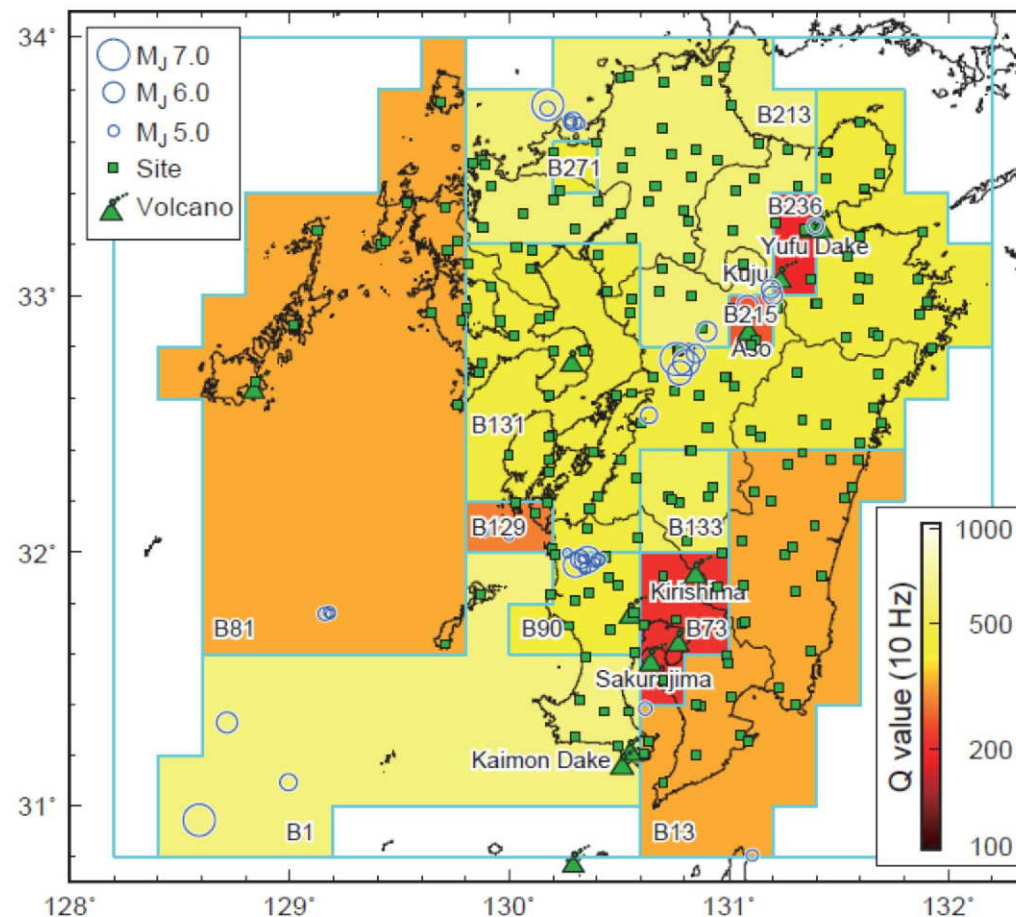


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure ※友澤ほか(2021)より抜粋

# 参考資料① 友澤ほか (2021) のブロックインバージョン結果の確認

## (2) 震源特性 $S_m(f)$

- 1997年鹿児島県北西部地震、2005年福岡県西方沖地震、2016年熊本地震の地震規模の大きな主な地震を対象に、推定した震源スペクトルとフィッティングした  $\omega^{-2}$  モデルとの比較の結果 (Fig. 9)、いずれの地震も  $\omega^{-2}$  モデルとの対応関係はよいことが確認されている。
- 本論文で推定した  $M_0$  は、F-netの  $M_0$  と比較すると多くの地震で一定の範囲で推定されており (Fig. 10)、短周期レベルについても既往の研究と同様の傾向になるとされている (Fig. 12)。

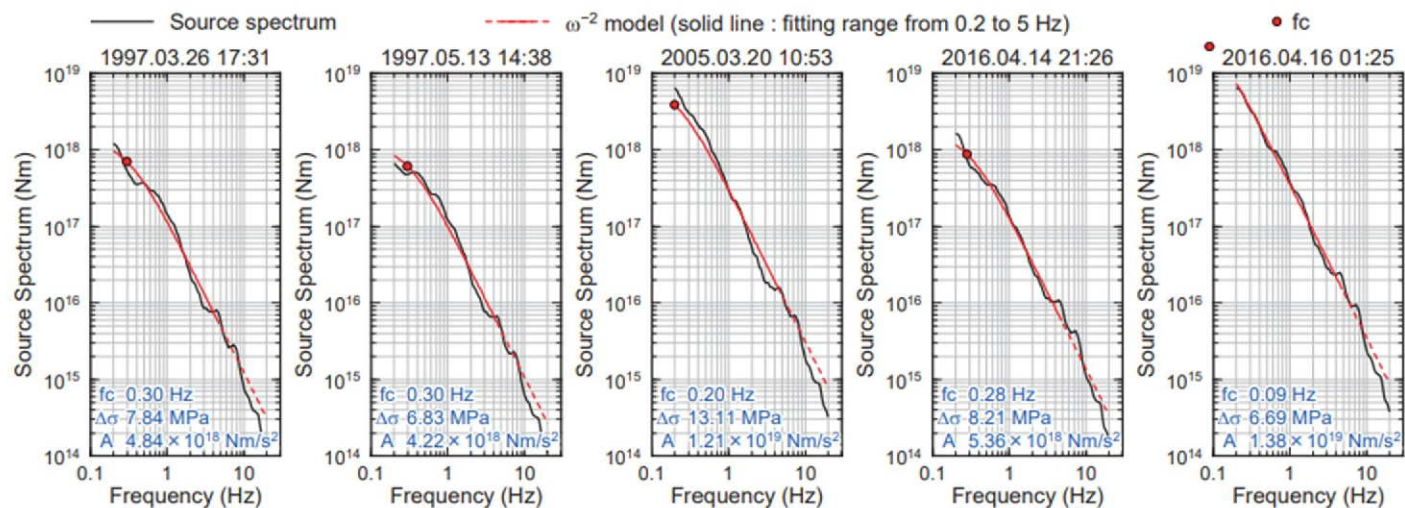


Fig.9 Source spectrum of each earthquake

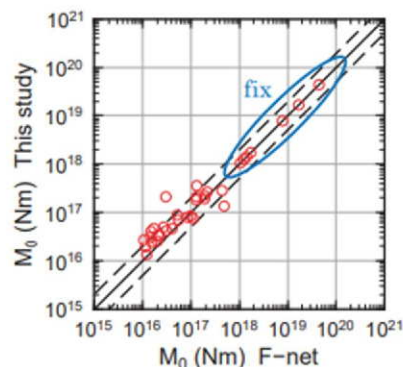


Fig.10 Comparison of  $M_0$  of F-net to that of this study

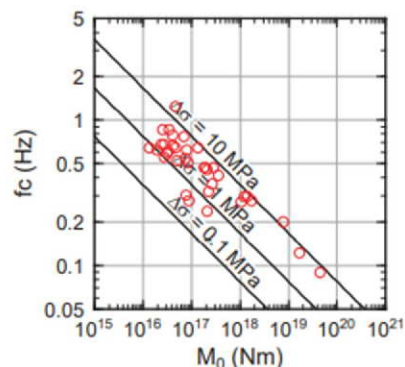


Fig.11 Scaling relation between  $M_0$  and  $f_c$

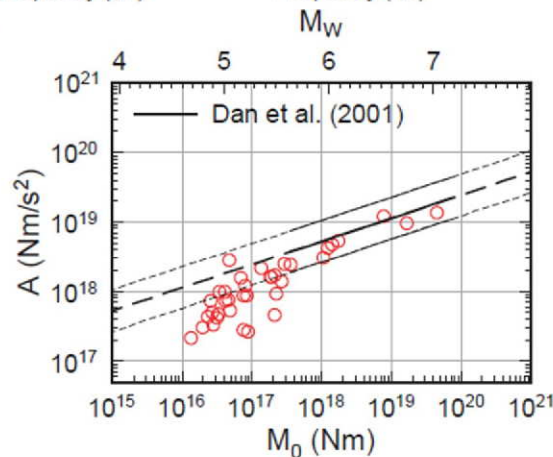


Fig.12 Scaling relation between  $M_0$  and  $A$

※友澤ほか (2021) より抜粋

# 参考資料① 友澤ほか(2021)のブロックインバージョン結果の確認

## (3) 地盤増幅特性 $G_n(f)$

- 岩盤相当の観測点において、推定したサイト増幅率と地盤モデルに基づく理論増幅率を比較した結果、均質な減衰構造を仮定した場合よりも不均質減衰構造を仮定した場合の残差が小さく、理論増幅率との対応がよいことを確認しており、既往の文献に基づく均質な減衰構造よりも改善する傾向がみられている。

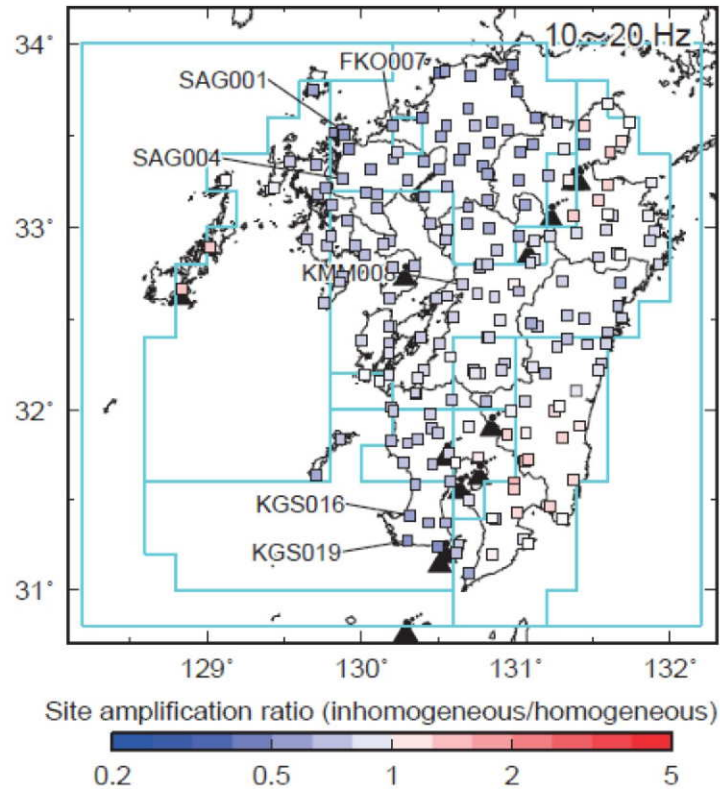


Fig.13 Spatial distribution of site amplification ratio

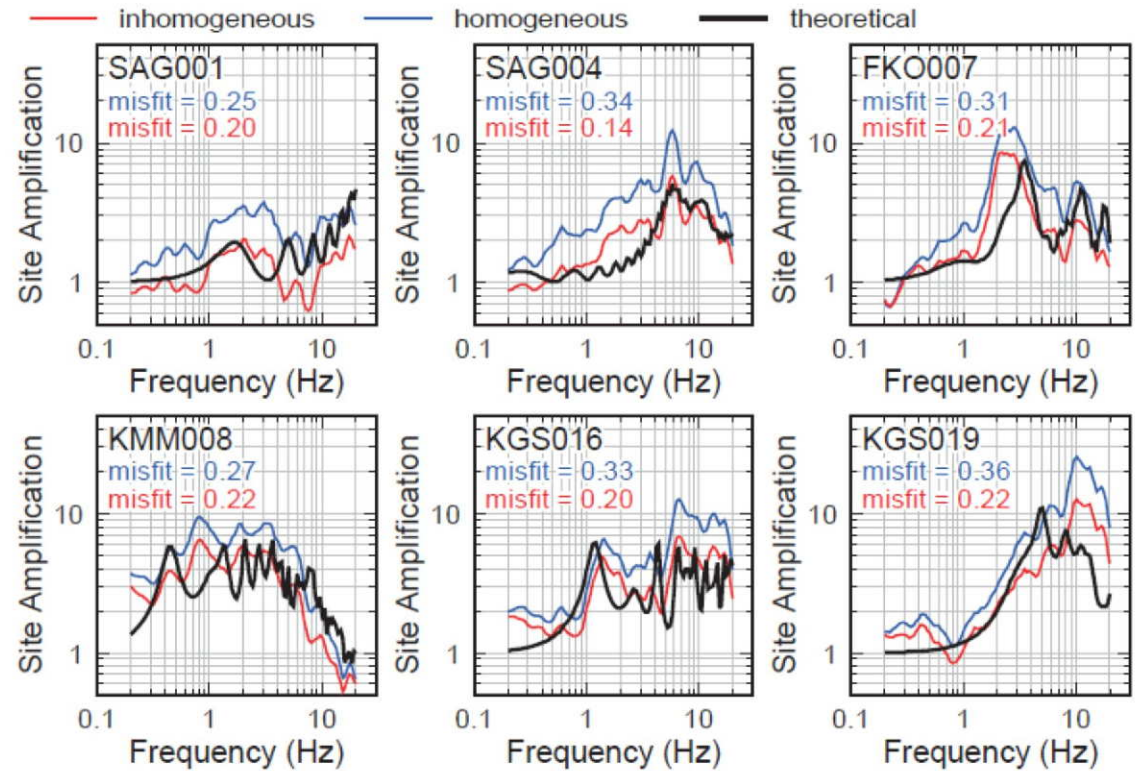


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

参考資料② ブロックインバージョンにおける残差

## 参考資料② ブロックインバージョンにおける残差

### ■ ブロックインバージョンにおける残差による3つの特性の分離

- ブロックインバージョンでは、 $m$ 地震・ $n$ 観測点のフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ は、震源特性 $S_m(f)$ 、伝播経路特性 $P_{mn}(f)$ 、地盤増幅特性 $G_n(f)$ の3つのスペクトル成分によりモデル化。

$$F_{mn}(f) = S_m(f)P_{mn}(f)G_n(f) \quad ※mは地震に対する添え字、nは観測点に関する添え字$$

- ブロックインバージョンにおける震源特性 $S_m(f)$ 、伝播経路特性 $P_{mn}(f)$ 、地盤増幅特性 $G_n(f)$ の3つのパラメータは、 $m$ 地震・ $n$ 観測点の観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差の二乗和が最小になるように分離される。

$$O_{mn}(f) = F_{mn}(f)E_{mn}(f) = S_m(f)P_{mn}(f)G_n(f)E_{mn}(f)$$

- 友澤ほか(2021)では、ブロックインバージョンによる分離された3つの特性が、既往研究から得られた知見などを踏まえ、適切であることが確認されている。(参考資料①参照)



## 参考資料② ブロックインバージョンにおける残差

### ■ ブロックインバージョン解析における残差の要因

- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ は下式で表される。

$$E_{mn}(f) = O_{mn}(f) / F_{mn}(f) \quad ※mは地震に対する添え字、nは観測点に関する添え字$$

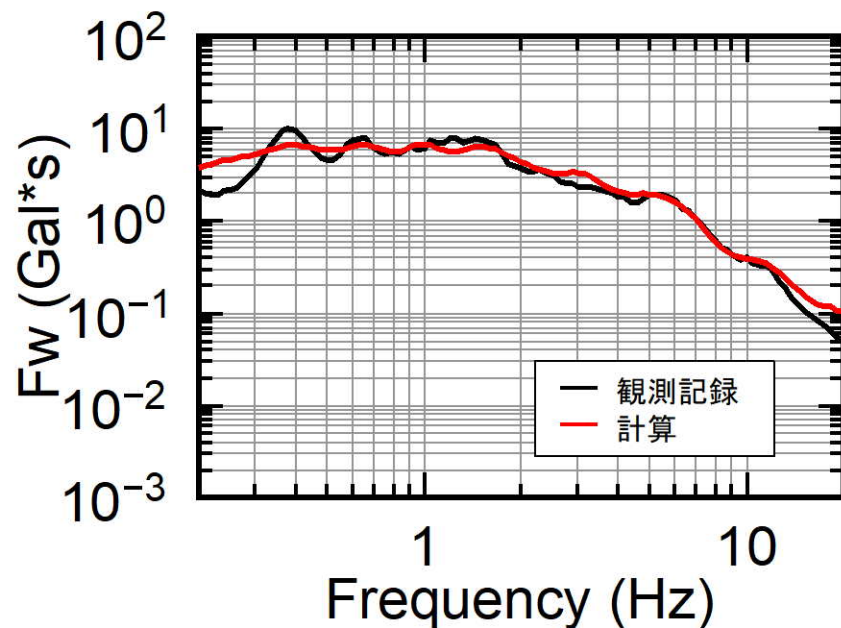
- 地震ごと、観測点ごとに残差 $E_{mn}(f)$ は異なるため、ブロックインバージョン結果を用いた地下構造モデル全体の妥当性確認における地震基盤相当面の地震波の作成では、この残差 $E_{mn}(f)$ の取扱いに留意する必要あり。
- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ は、下記の要因等が考えられる。
  - 震源の破壊伝播効果、放射特性
  - 表面波などのS波部分以外の波形
  - 各特性の推定誤差 など
- 残差 $E_{mn}(f)$ が1.0に近いほど、観測記録 $O_{mn}(f)$ と計算 $F_{mn}(f)$ が一致する。

$$O_{mn}(f) = F_{mn}(f)E_{mn}(f) \quad ※mは地震に対する添え字、nは観測点に関する添え字$$

## 参考資料② ブロックインバージョンにおける残差

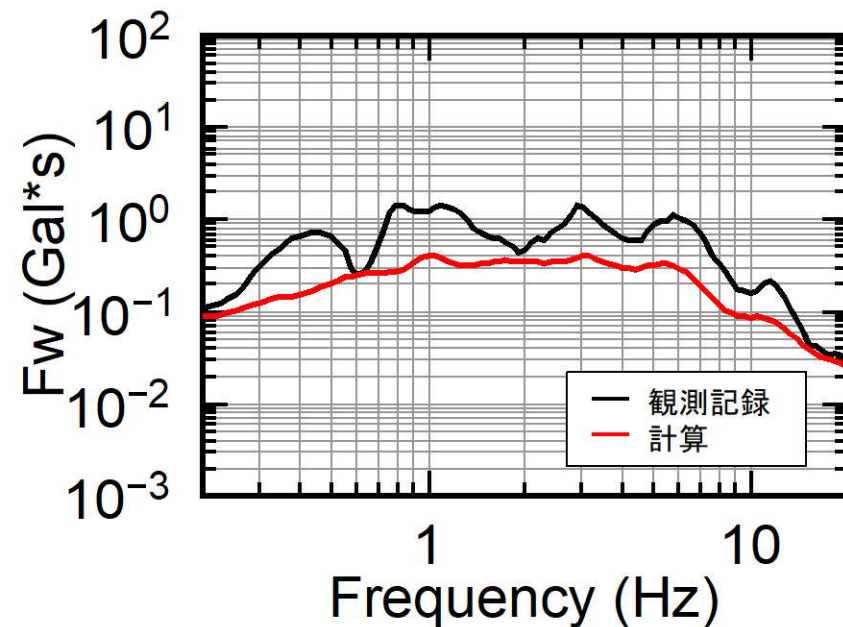
### ■ 地震ごとの残差について

- 破壊伝播効果などの影響を受けている地震では、観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ に差がみられ、残差 $E_{mn}(f)$ が1.0から乖離する。



残差が1.0に近い地震の例

⑪熊本県熊本地方の地震



残差が1.0から乖離した地震の例

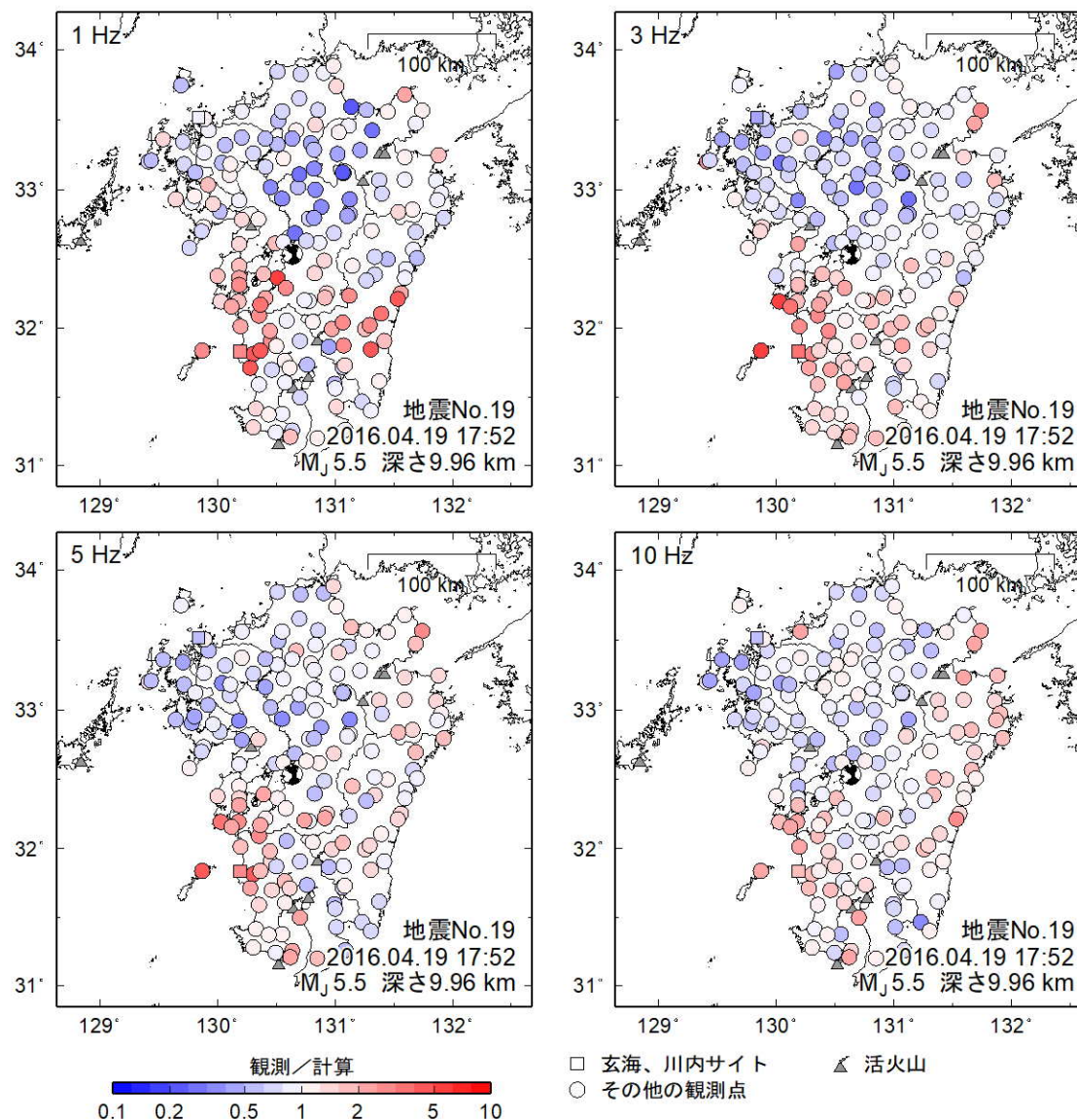
⑲熊本県熊本地方の地震

川内原子力発電所の地震ごとのフーリエ振幅スペクトルの比較の例

## 参考資料② ブロックインバージョンにおける残差

### ■ 観測点ごとの残差の空間分布

- ブロックインバージョン解析において、震源特性 $S_m(f)$ は全観測点の平均的な特性を算出したものであり、方位性を有する破壊伝播効果等は考慮されていない。観測点ごとの残差の空間分布に偏りがある場合、破壊伝播効果などの影響を受けていると考えられる。



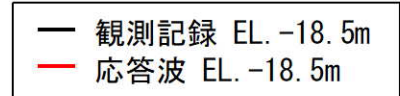
⑱熊本県熊本地方の地震

残差の空間分布の例

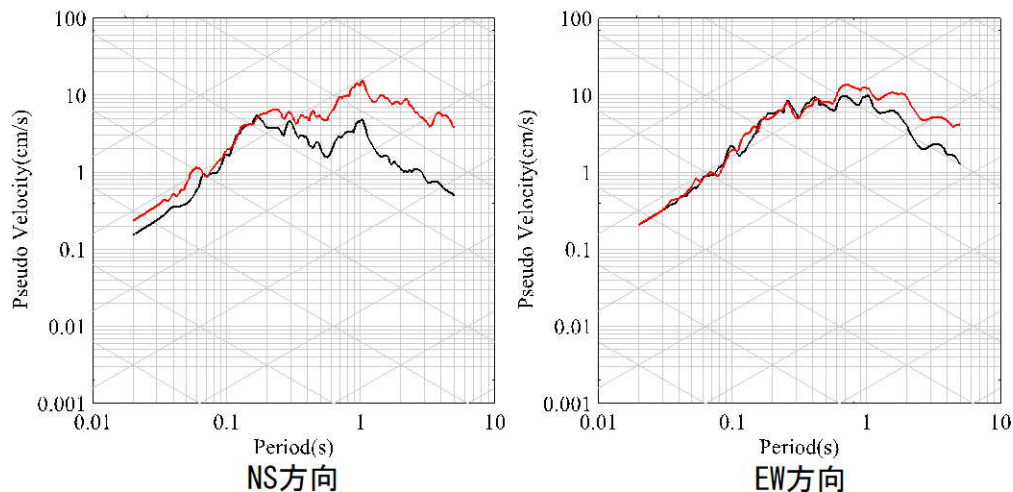
参考資料③ 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認状況

# 参考資料③ 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認状況

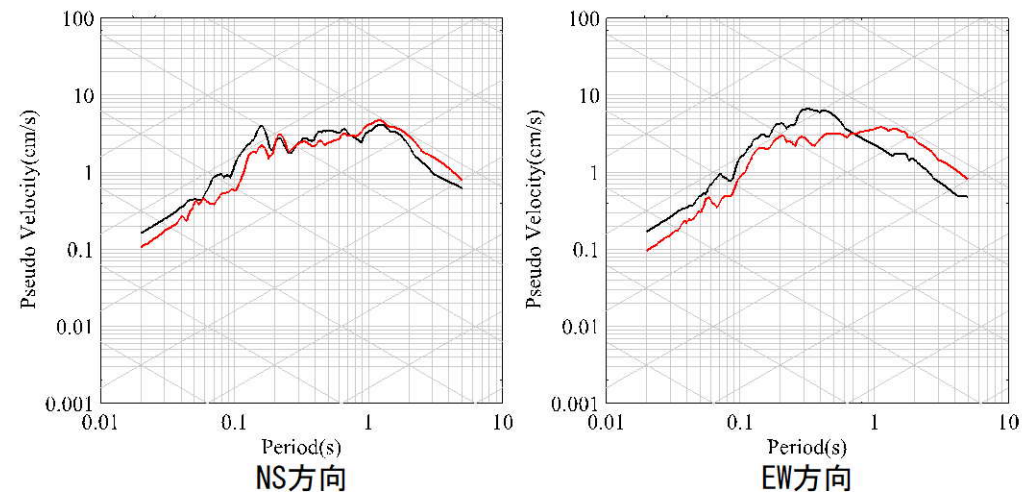
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (1/4)



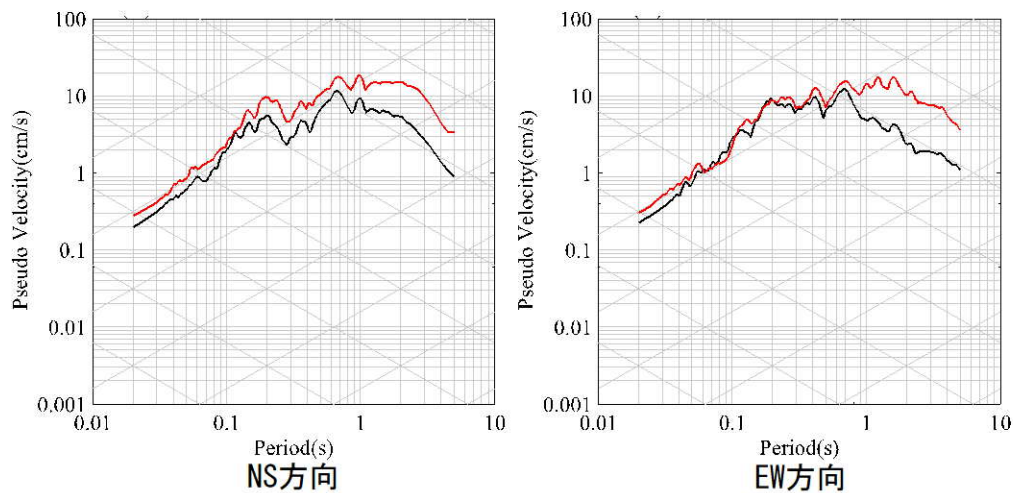
③鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



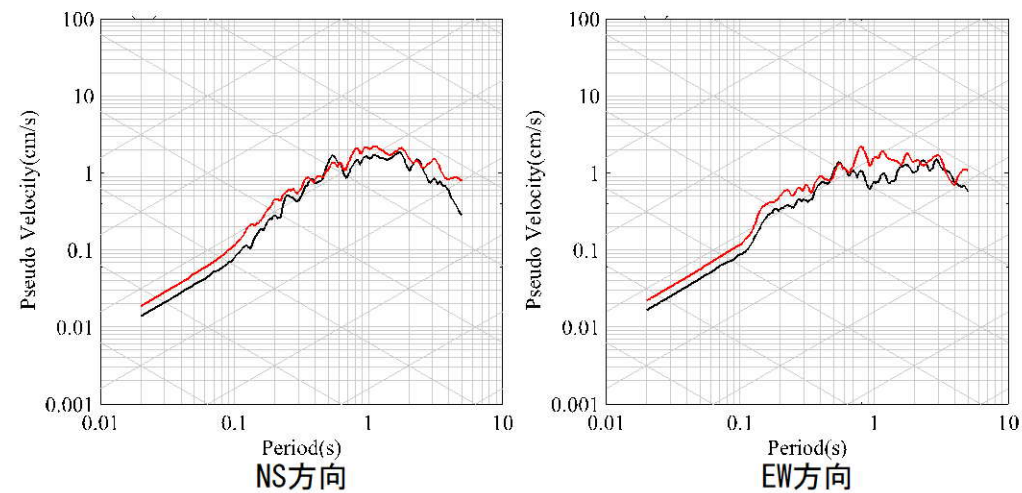
④鹿児島県北西部



⑤鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



⑥薩摩半島西方沖

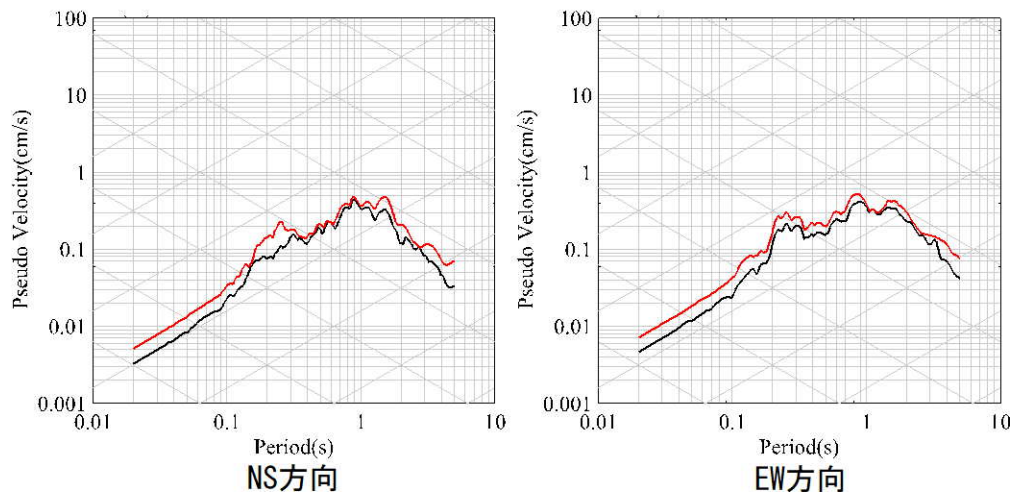


# 参考資料③ 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認状況

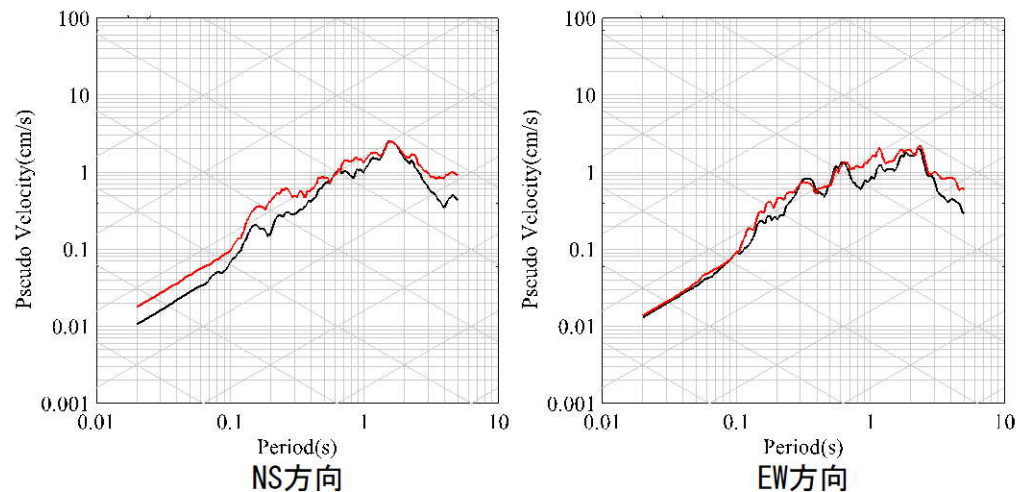
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (2/4)

— 観測記録 EL. -18.5m  
 — 応答波 EL. -18.5m

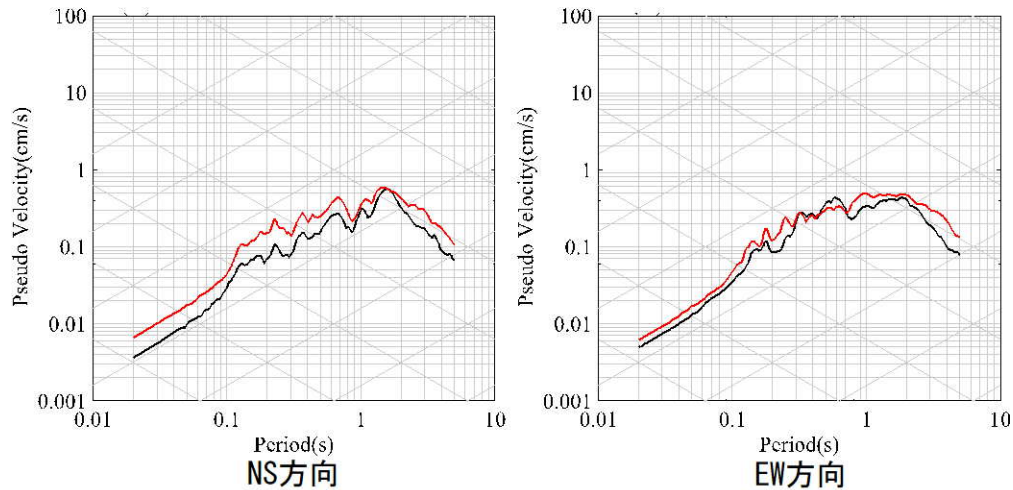
⑦薩摩半島西方沖



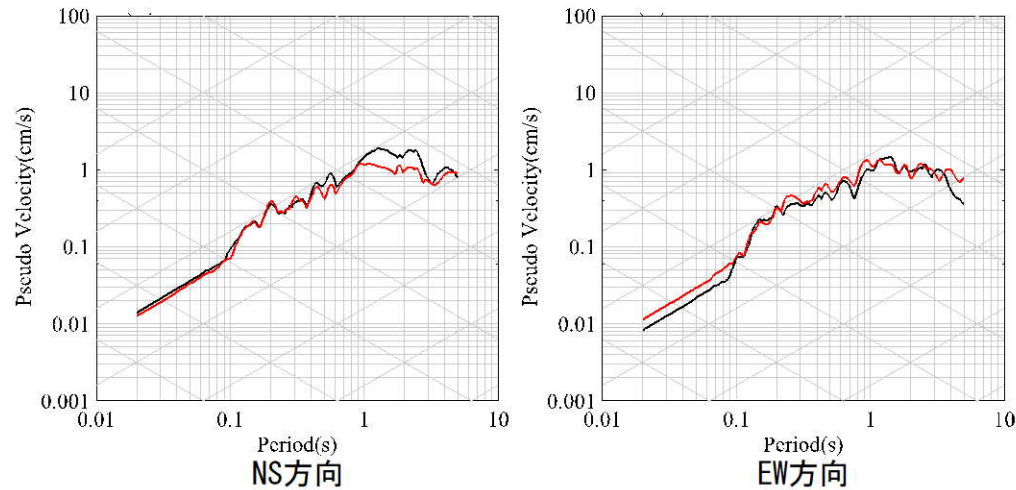
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



⑨熊本県熊本地方



⑩熊本県熊本地方

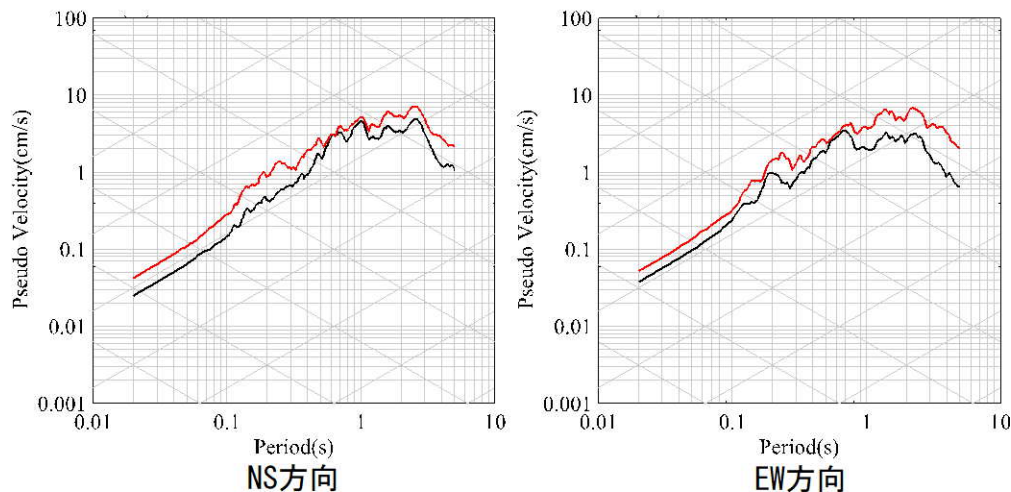


# 参考資料③ 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認状況

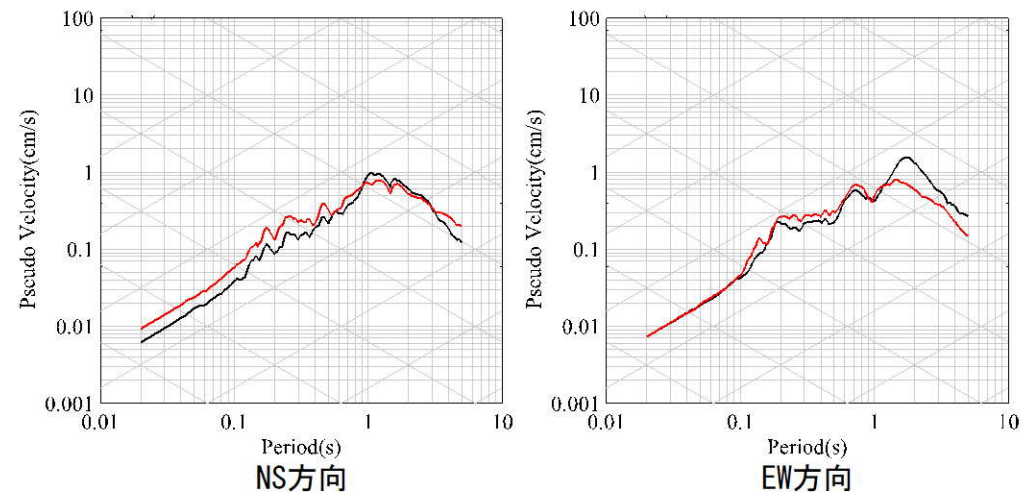
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (3/4)

— 観測記録 EL. -18.5m  
 — 応答波 EL. -18.5m

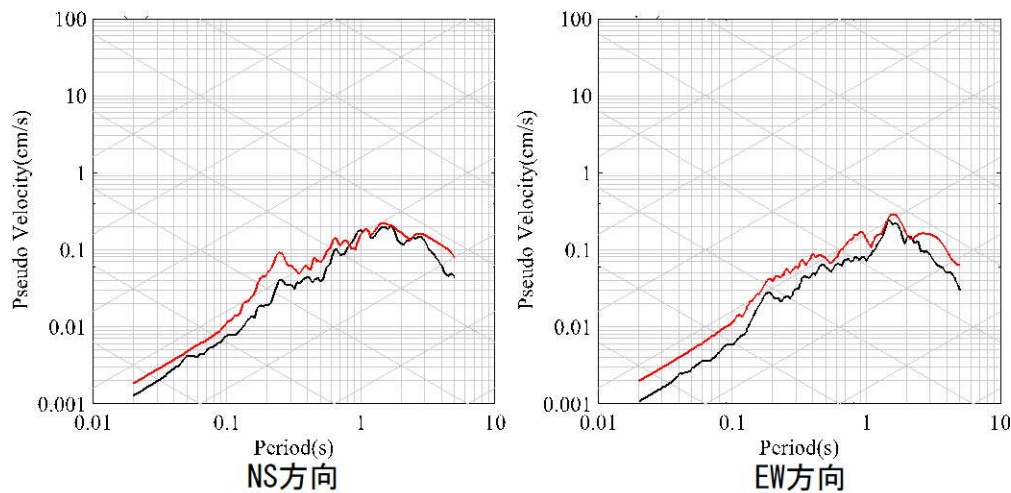
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



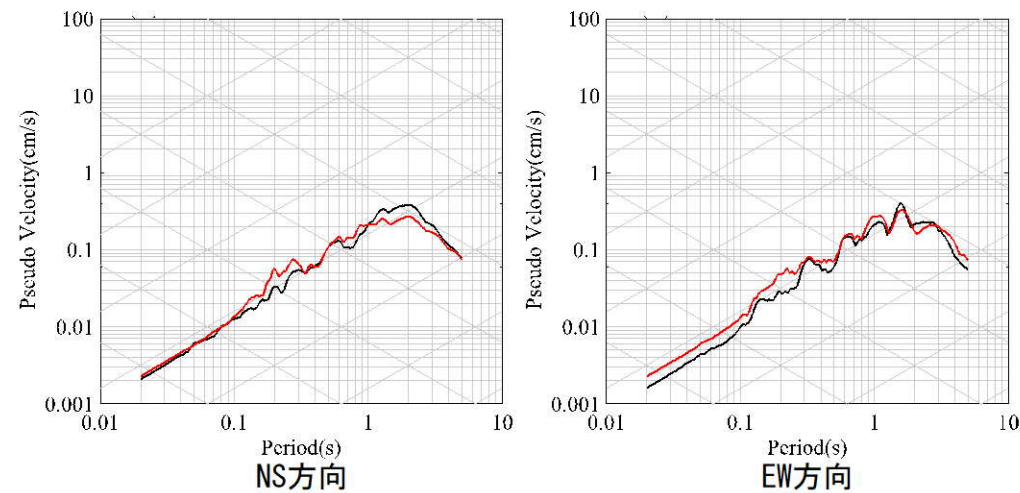
⑬ 熊本県熊本地方



⑭ 熊本県阿蘇地方



⑮ 熊本県阿蘇地方

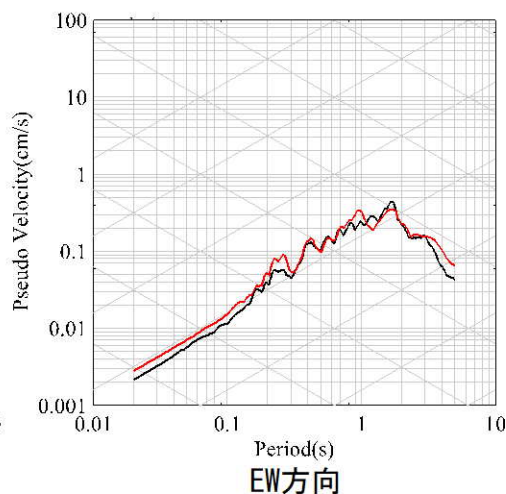
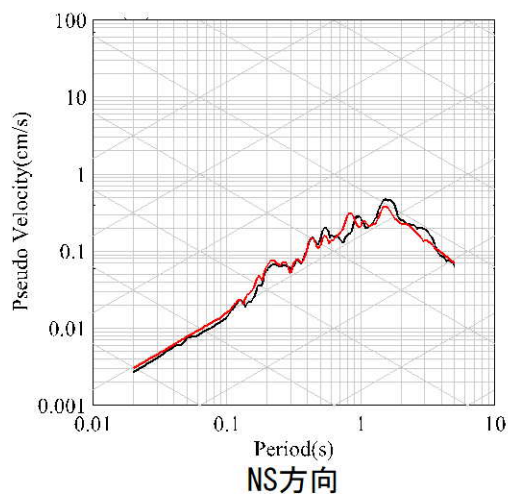


# 参考資料③ 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波による妥当性確認状況

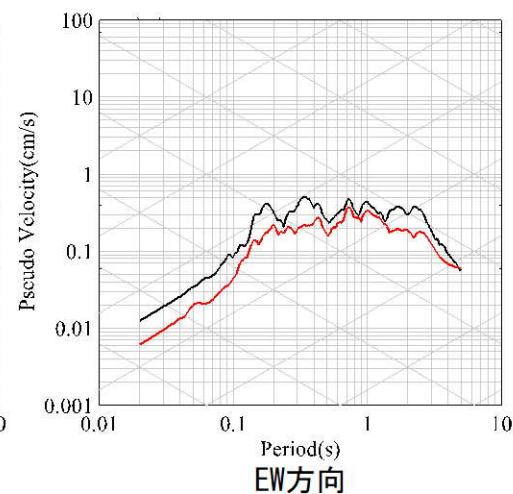
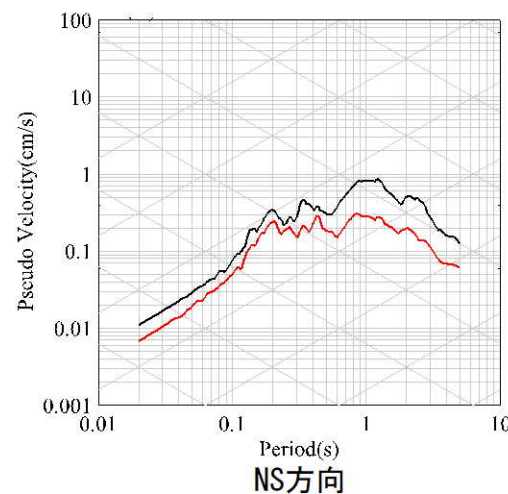
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (4/4)

— 観測記録 EL. -18.5m  
— 応答波 EL. -18.5m

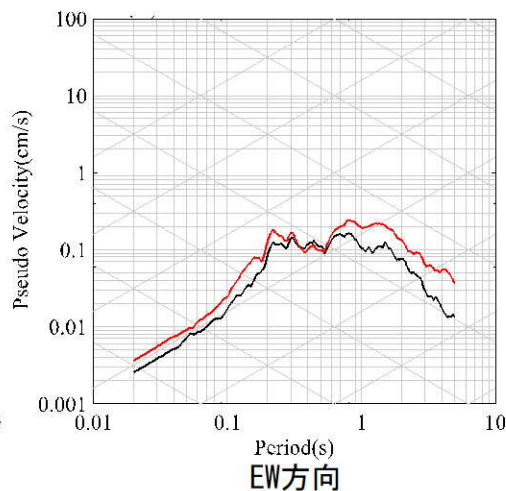
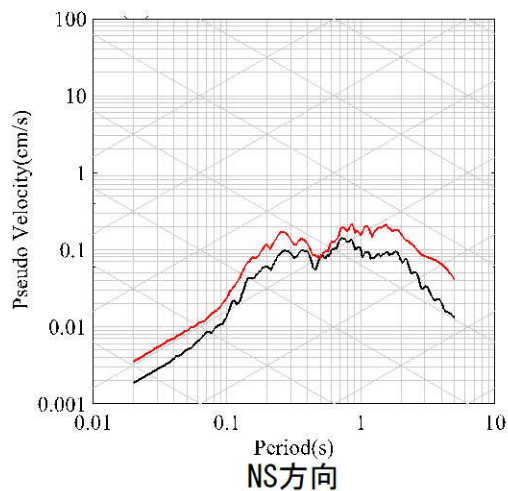
⑱ 熊本県阿蘇地方



⑲ 熊本県熊本地方



⑳ 薩摩半島西方沖





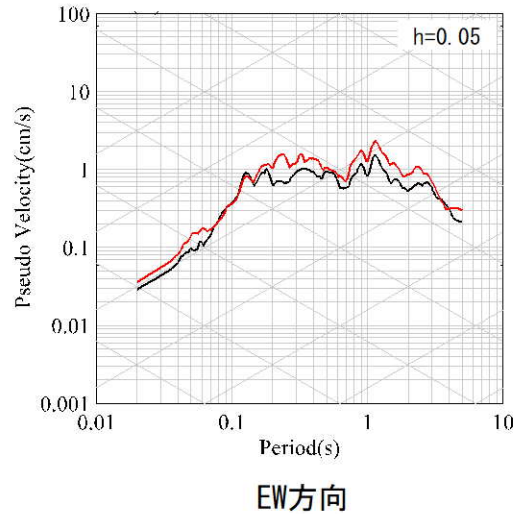
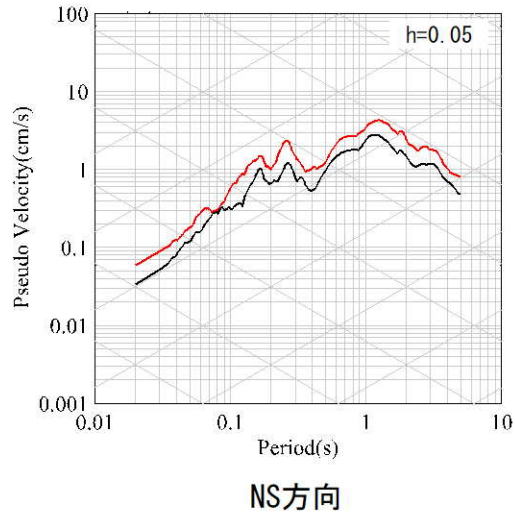
参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況

# 参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況

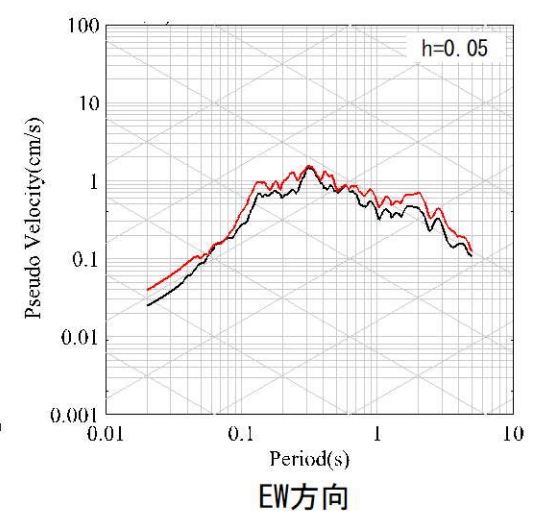
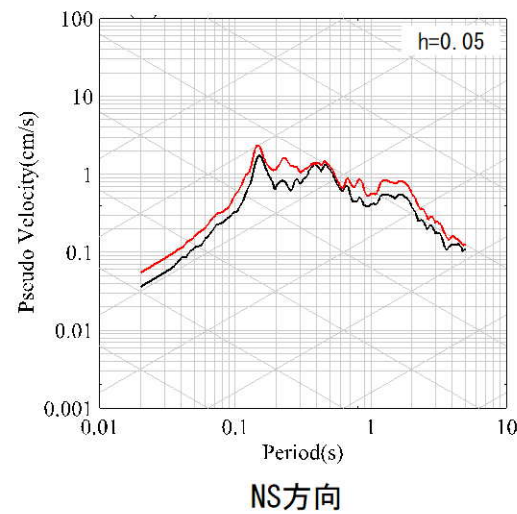
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (1/5)

— 観測記録 EL. -18.5m  
— 応答波 EL. -18.5m

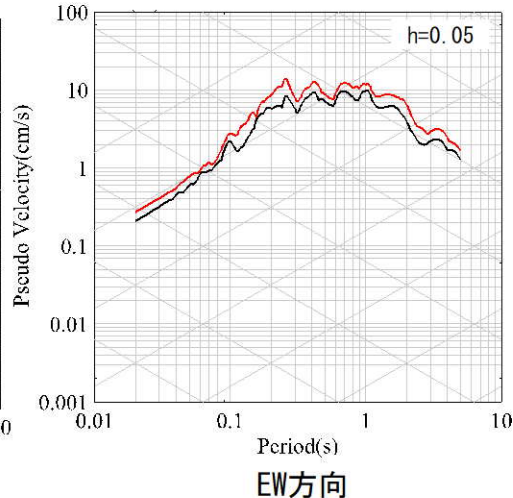
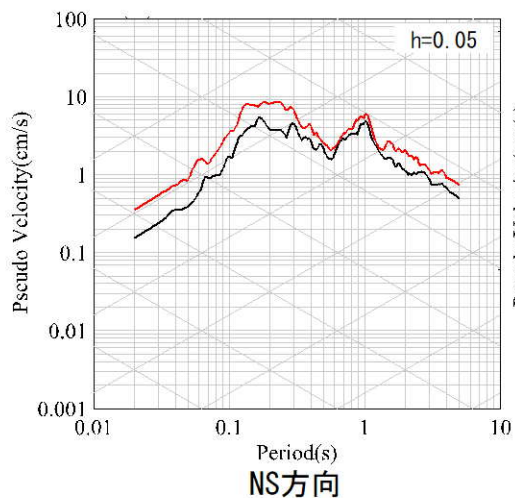
①九州西側海域



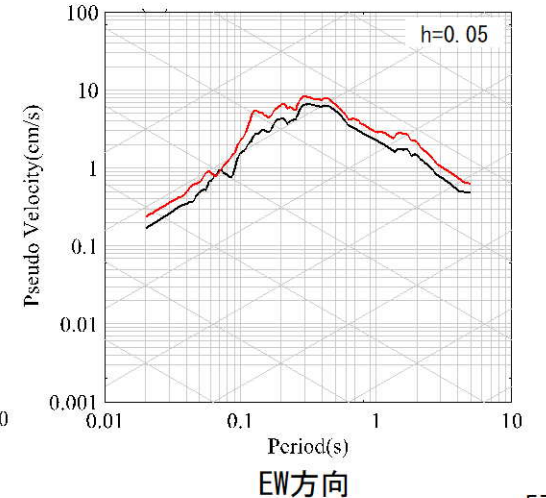
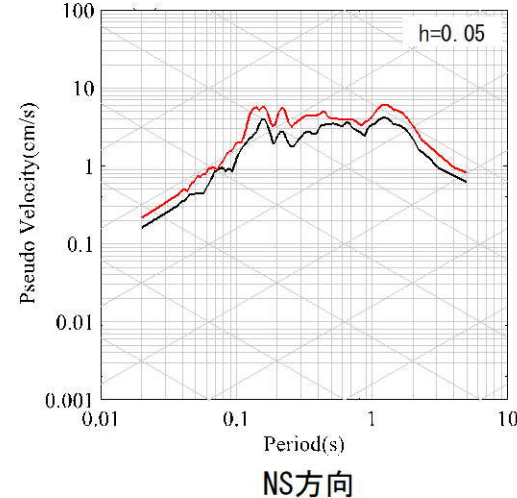
②鹿児島県北西部



③鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



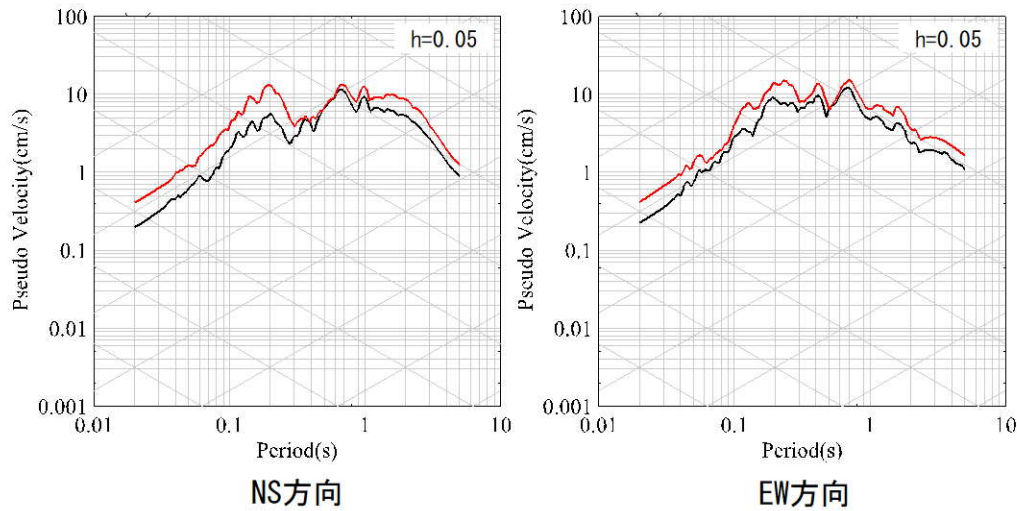
④鹿児島県北西部



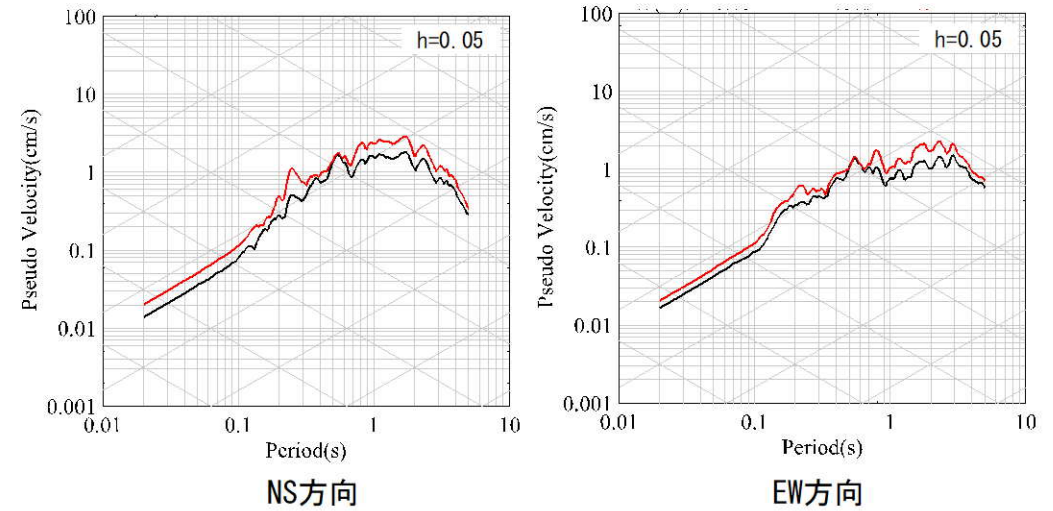
# 参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況

## ■ 応答スペクトルの比較結果 (2/5)

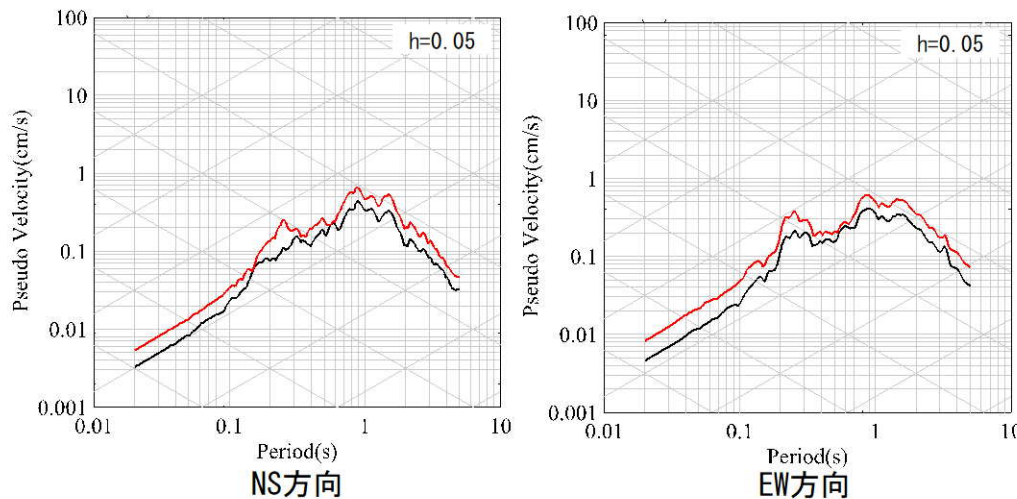
⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



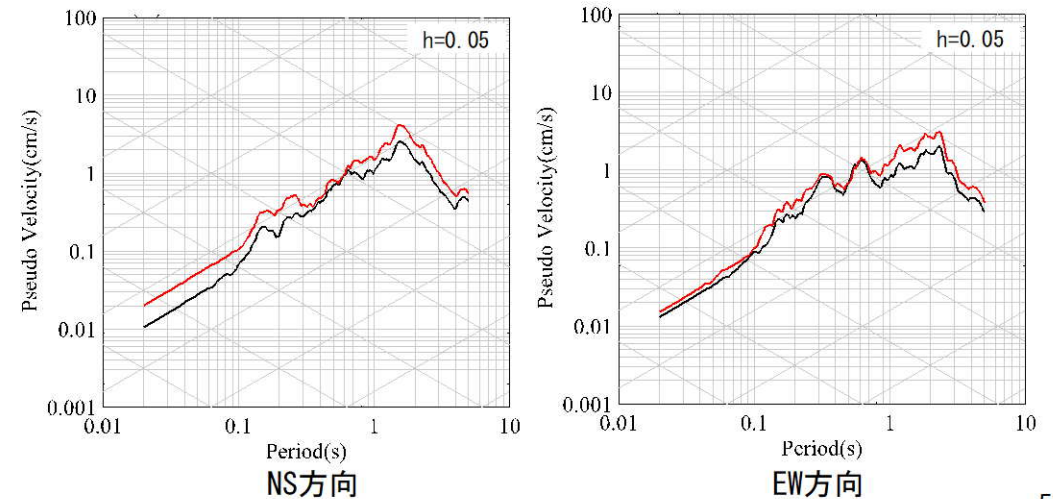
⑥ 薩摩半島西方沖



⑦ 薩摩半島西方沖



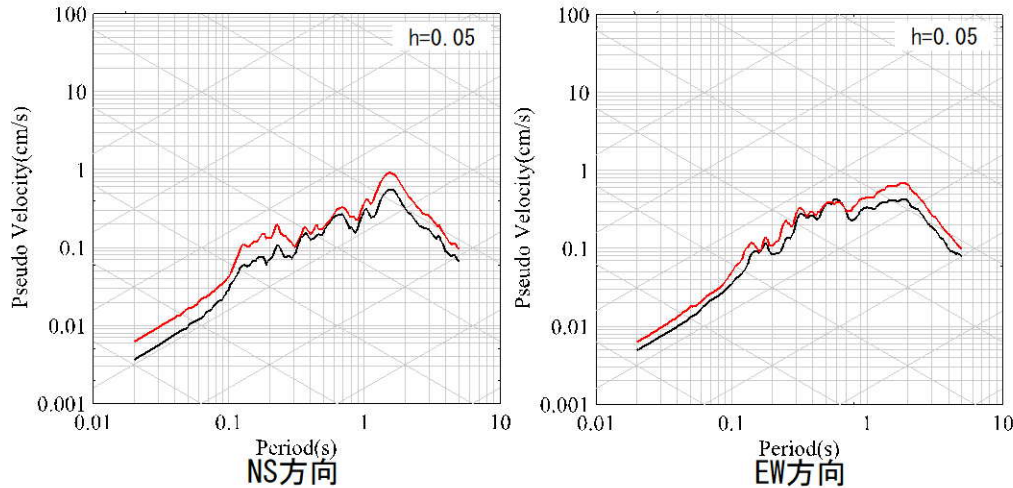
⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



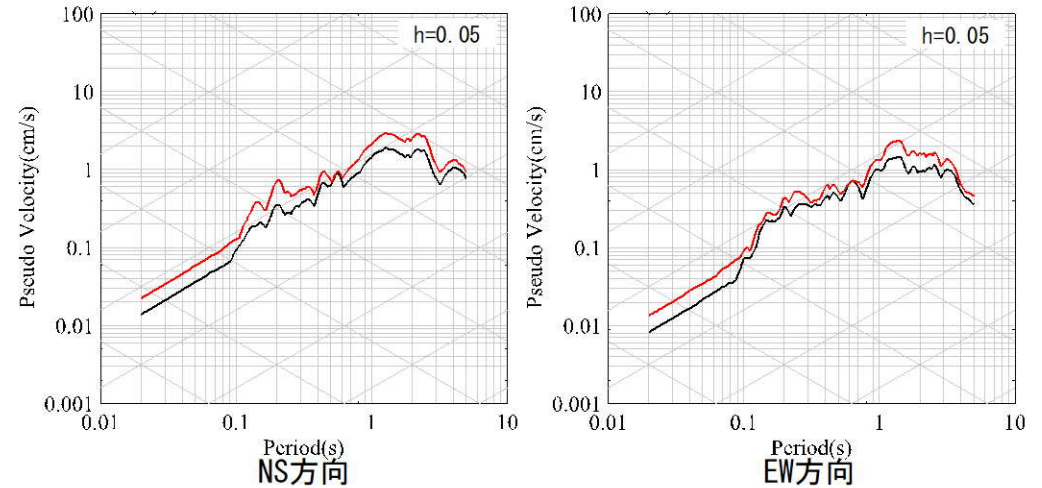
# 参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況

## ■ 応答スペクトルの比較結果 (3/5)

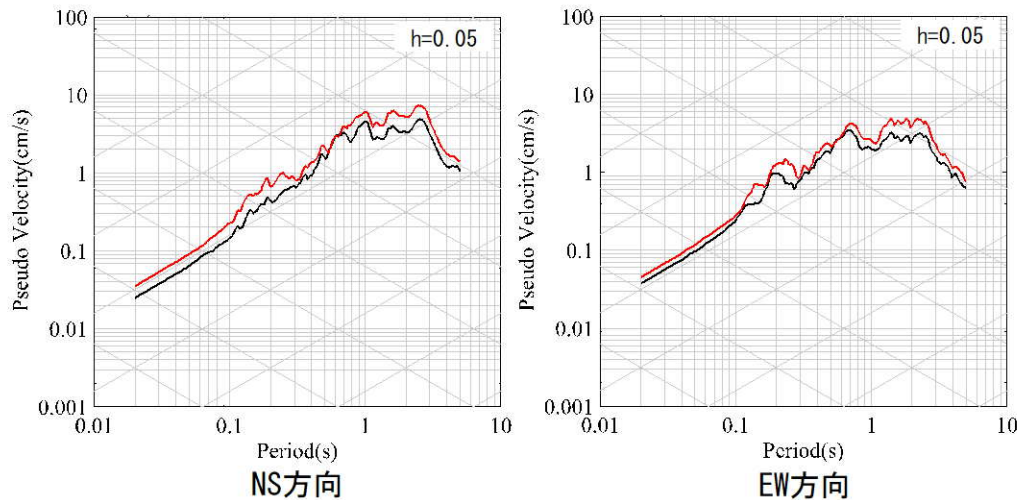
⑨ 熊本県熊本地方



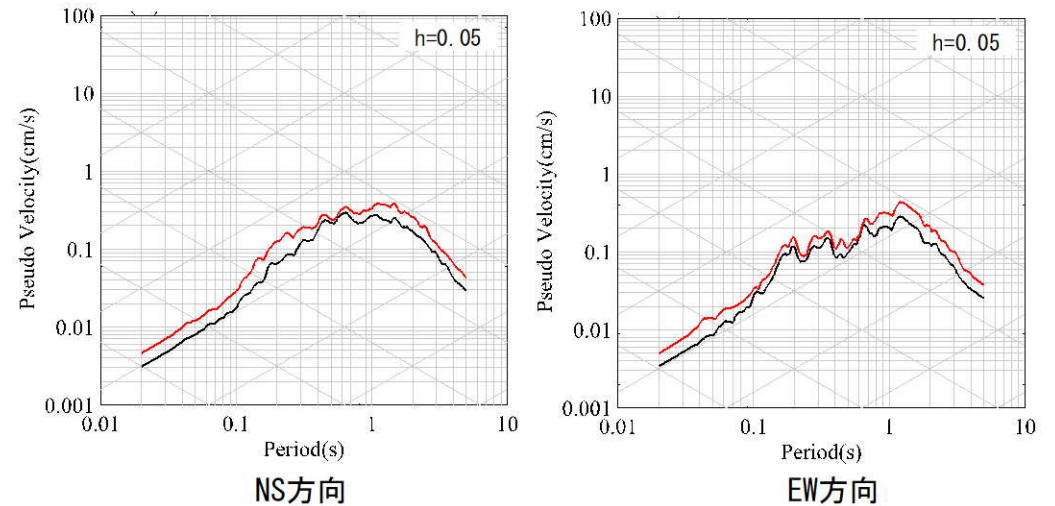
⑩ 熊本県熊本地方



⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



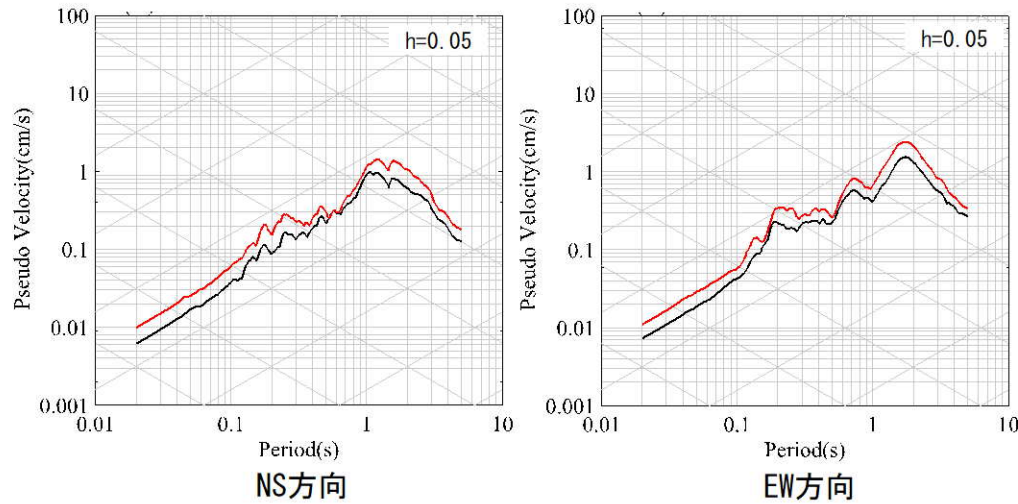
⑫ 熊本県熊本地方



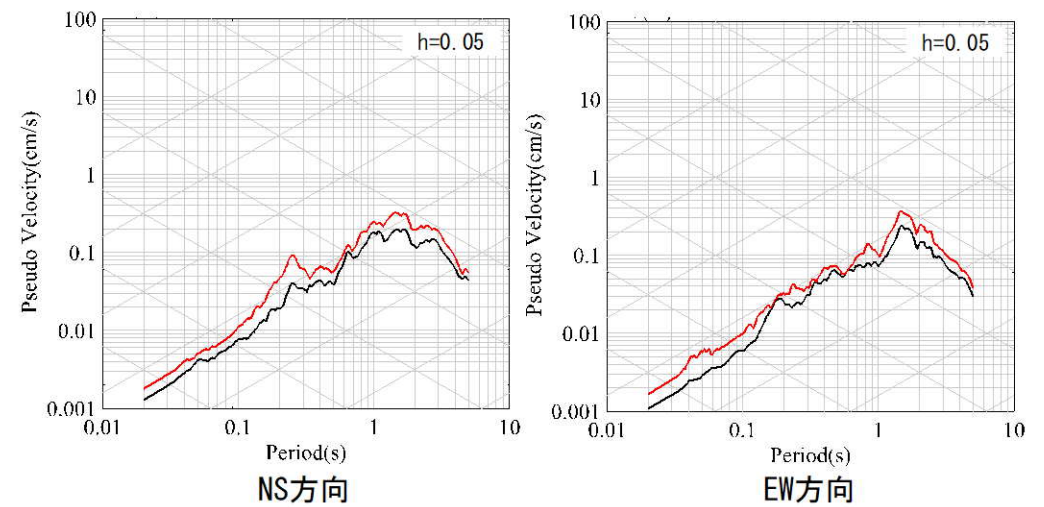
# 参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況

## ■ 応答スペクトルの比較結果 (4/5)

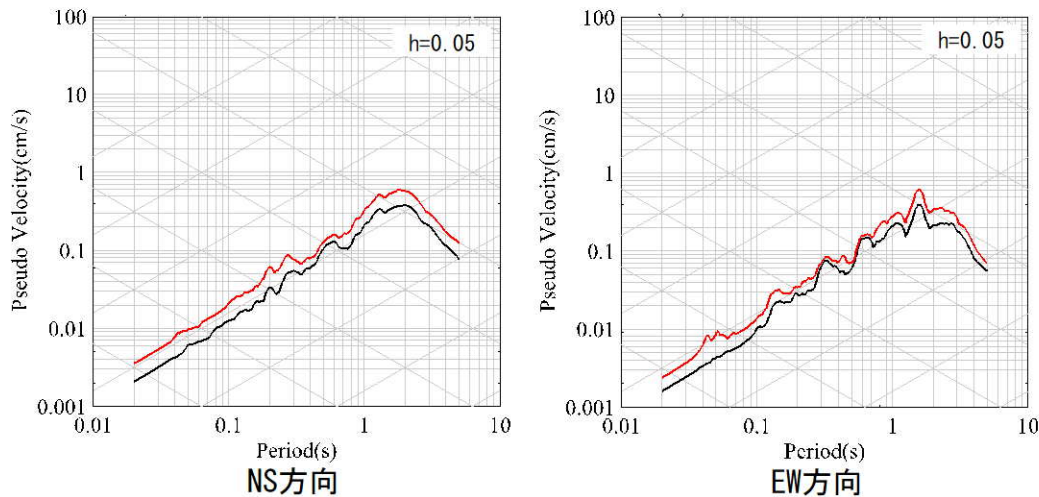
⑬ 熊本県熊本地方



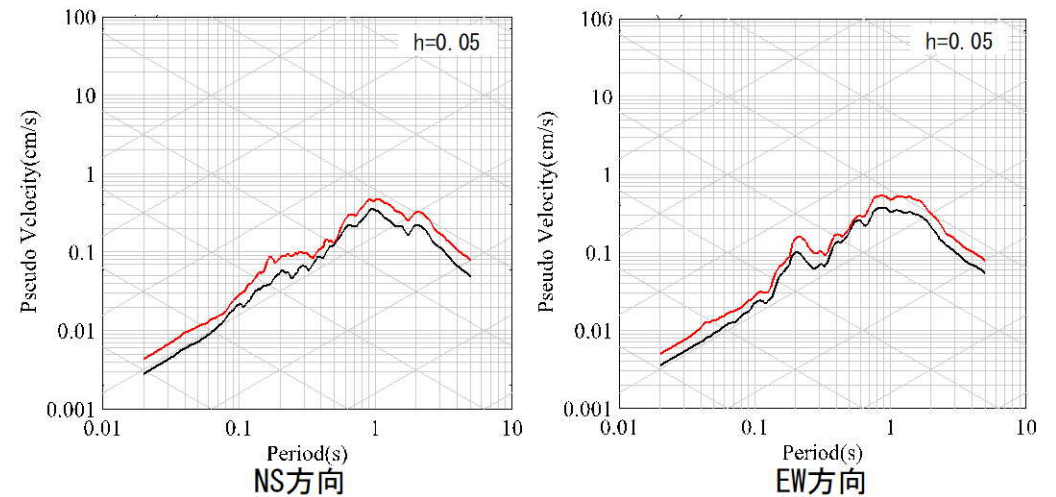
⑭ 熊本県阿蘇地方



⑮ 熊本県阿蘇地方



⑯ 熊本県熊本地方



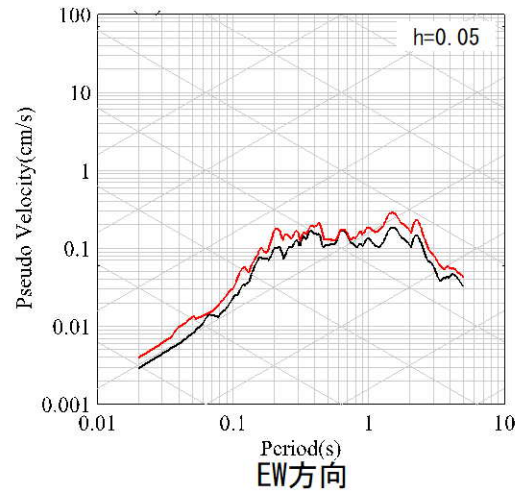
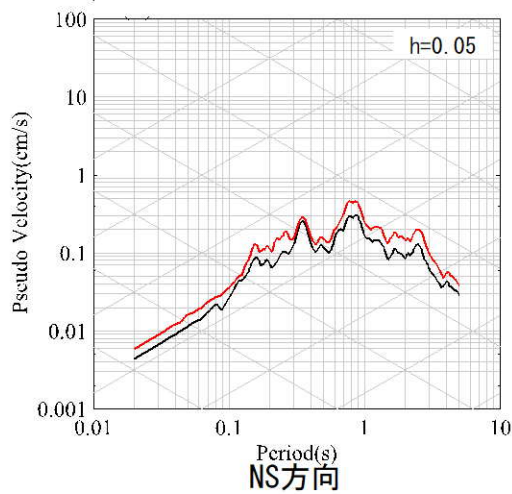
— 観測記録 EL. -18.5m  
— 応答波 EL. -18.5m

# 参考資料④ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震波による妥当性確認状況

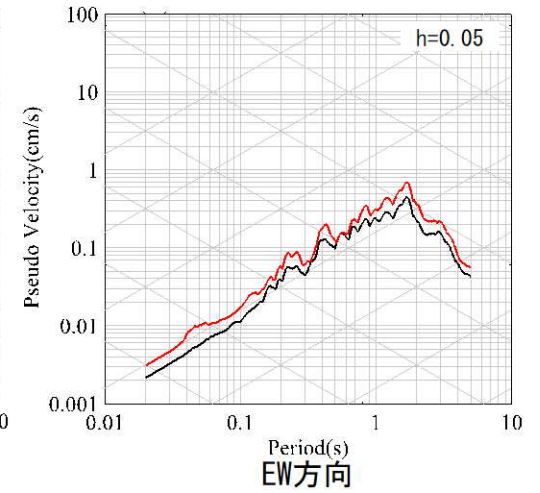
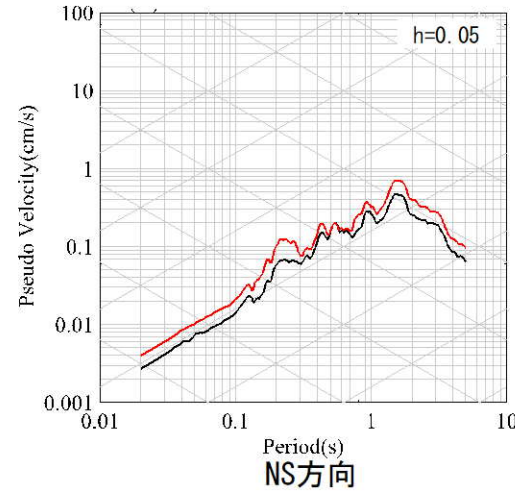
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (5/5)

— 観測記録 EL. -18.5m  
— 応答波 EL. -18.5m

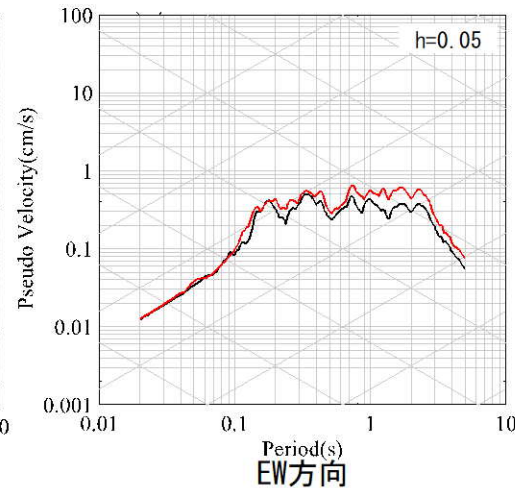
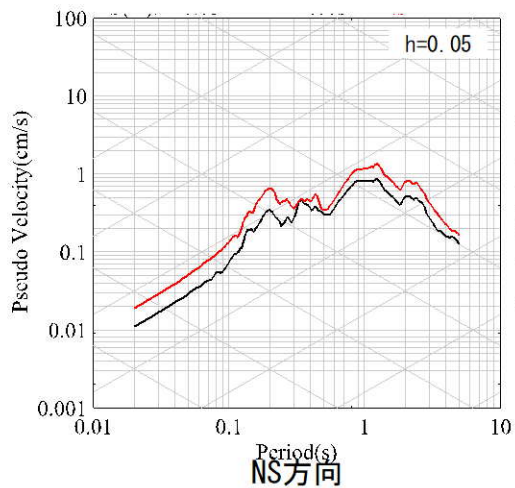
⑰ 熊本県熊本地方



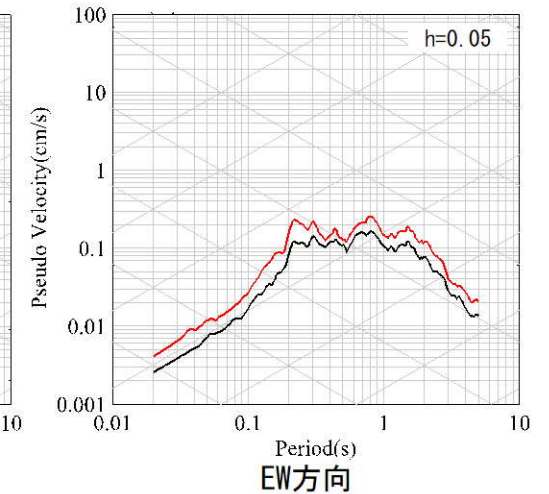
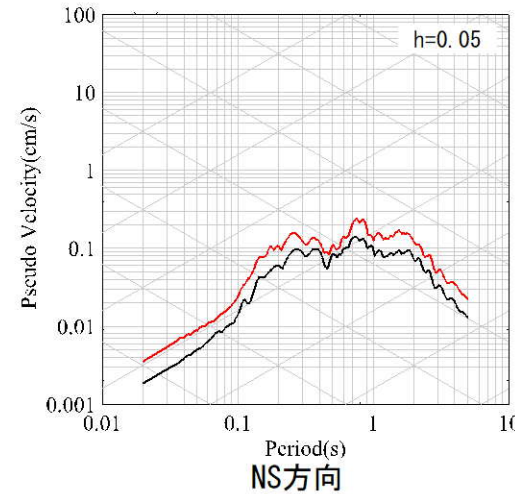
⑱ 熊本県阿蘇地方



⑲ 熊本県熊本地方



⑳ 薩摩半島西方沖



## 参考文献

- 1) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎(2021) : 九州地域の震源特性・不均質伝播経路特性・サイト増幅特性の推定 強震観測記録のブロックインバージョン解析に基づく検討、日本建築学会構造系論文集、第86巻、第790号、1597-1606、2021年12月.