

# 玄海原子力発電所3号炉及び4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)

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. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析	P. 6
3. 地下構造モデルの再検討	P. 14
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. 15
3.2 地下構造モデルの妥当性確認及び今後の検討方針	P. 18
3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認	P. 20
3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認	P. 31
4. 地下構造モデルの設定	P. 36
5. 今後の確認内容	P. 44
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. 51
参考資料② ブロックインバージョンにおける残差	P. 55
参考資料③ 今回対象とした規模の大きな地震の残差	P. 60



## 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	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
2	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
3	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
4	乱数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
5	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
6	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
7	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
8	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. 2について 第1103回会合にて説明
9	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
10	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
11	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で説明する等、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

# 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
12	地下構造モデルについて、追加調査結果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)	今回説明

## ■ 川内原子力発電所に関するコメントの反映

- ・ 第983回審査会合において、川内原子力発電所に関するコメントを受領。
- ・ 玄海原子力発電所についても共通する以下のコメントへの対応を実施。

No.	コメント	指摘場所	対応状況
S-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、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. -90m~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
S-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
S-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、 $V_s=2, 100\text{m/s}$ の層上面(EL. -200m)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
S-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
S-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



## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

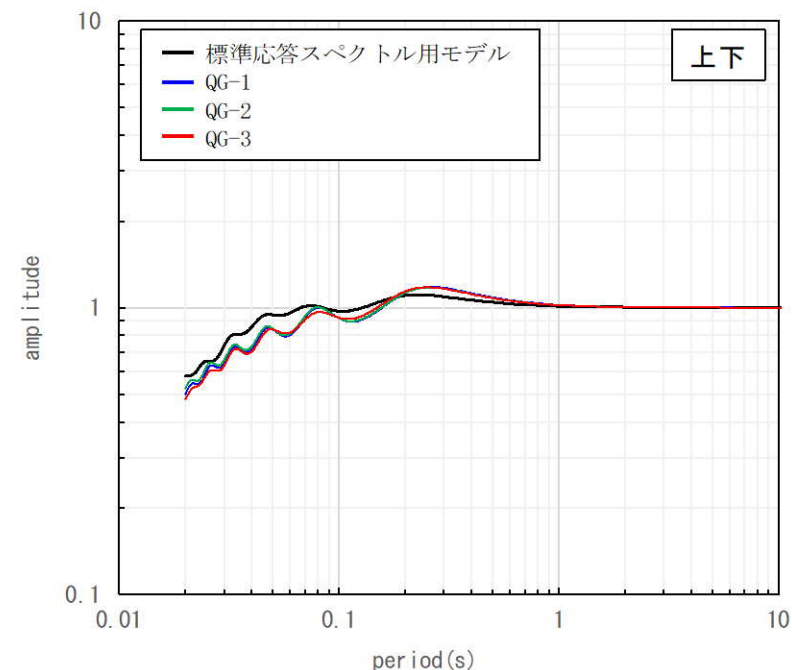
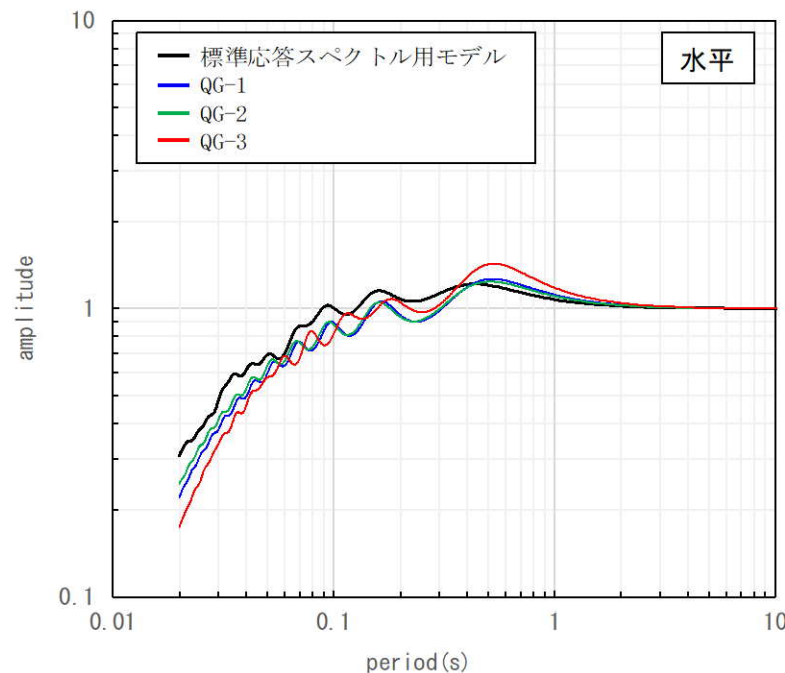
### ■ 第1103回審査会合におけるご指摘

- 地下構造モデルについて、PS検層モデルの伝達関数に見られる一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）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。

#### ■ 伝達関数の比較

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による理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）が、PS検層モデルによる理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）に対して、同等もしくは上回ることを確認。
- なお、QG-3については、一部の周期帯（水平：0.5秒付近）において下回るが、PS検層モデルの伝達関数が有する特徴的なピークの影響によるものと考えられる。
  - 追加調査ボーリングのPS検層結果は、標準応答スペクトル用モデルに比べ、速度構造のコントラストが大きく、その結果として、PS検層モデルの伝達関数に特徴的なピークが現れていると考えられる。





## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

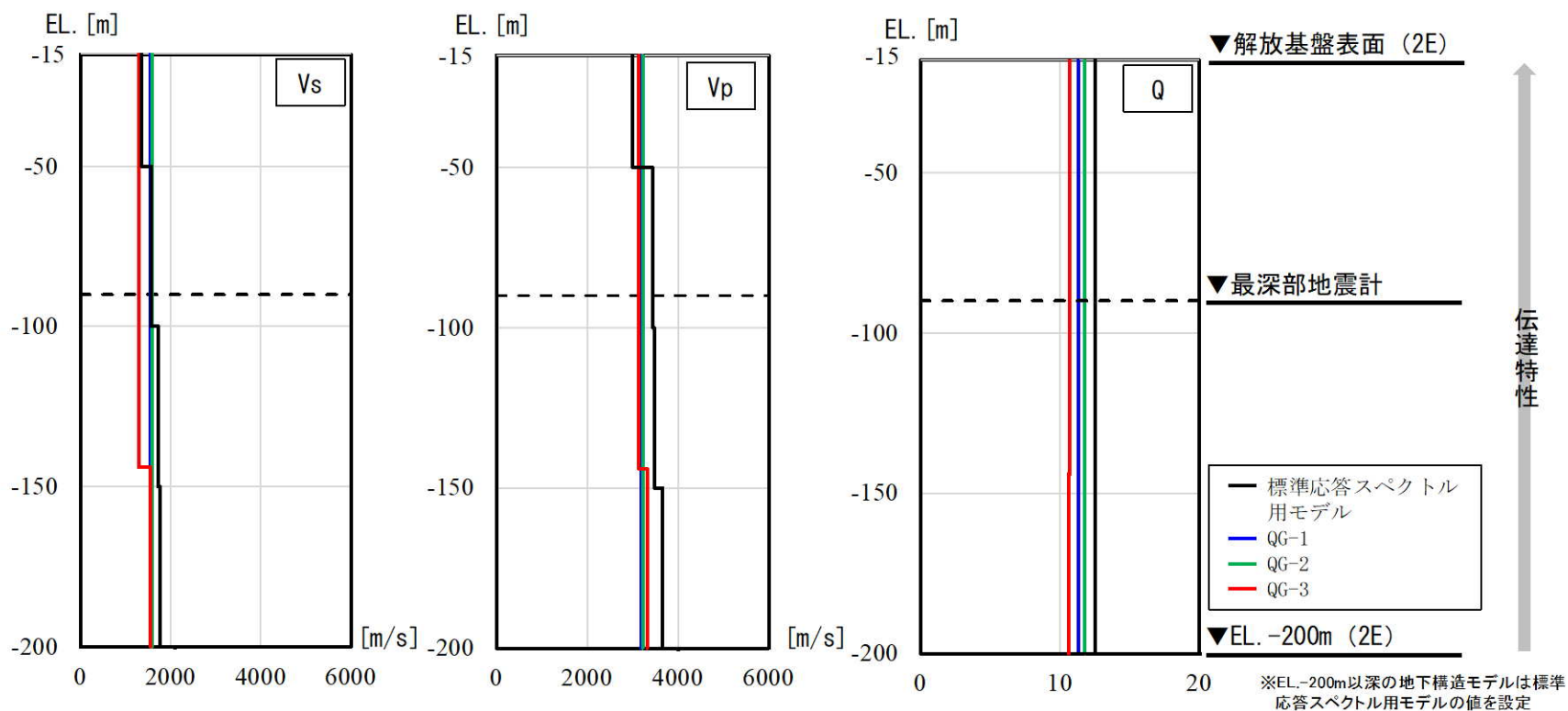
### ■ 追加ボーリング調査を踏まえたPS検層モデルの設定

- ・ 発電所構内の追加ボーリング調査により、EL. -200mまでの範囲において、速度 ( $V_s$ 、 $V_p$ ) 及び地盤減衰 (Q値) が得られており、調査結果を踏まえ、PS検層モデルを設定した。

#### ■ PS検層モデルの設定

第1103回審査会合資料より抜粋

- ・ 追加ボーリング孔におけるPS検層結果を踏まえ、PS検層モデルを設定。
- ・ 追加ボーリング孔におけるPS検層による速度 ( $V_s$ 、 $V_p$ ) は、標準応答スペクトル用モデルと概ね整合しているものの、QG-3の $V_s$ は、標準応答スペクトル用モデルに比べ、小さい傾向。
- ・ 追加ボーリング孔におけるPS検層によるQ値は、いずれも標準応答スペクトル用モデルの $Q=12.5$ を下回る。なお、得られたQ値は、高周波数側におけるQ値の上限値に対応すると考えられるが、周波数によらず一定のQ値を設定。



## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

### ■ 計算の境界条件（EL-200mでの速度コントラスト）の影響検討

- PS検層モデルの理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の算出にあたり、EL. -200m以深の設定が必要であり、EL. -200m以深は標準応答スペクトル用モデルを流用。
- PS検層モデルの理論伝達関数に見られる一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）におけるピークの生成要因は、計算の境界条件（EL-200mでの速度コントラスト）の影響によるものと考えられるため、以下の2ケースの検討による影響確認を実施した結果、計算の境界条件（EL-200mでの速度コントラスト）によることを確認。
  - 速度コントラストをなくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深を上層と同じ速度に設定）
  - 速度コントラストを大きくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深の速度を大きく設定）

地表 ▼ (EL. 11.0m)	標準応答スペクトル用 モデル			QG-1モデル			QG-2モデル			QG-3モデル		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
▼ (EL. -50.0m)	1350	3000	12.5									
▼ (EL. -100m)	1570	3440	12.5							1300	3140	10.7
▼ (EL. -144m)	1730	3470	12.5	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8			
▼ (EL. -150m)												
▼ (EL. -200m)	1770	3650	12.5							1550	3320	10.6
	2100	4000	200	2100	4000	200	2100	4000	200	2100	4000	200

## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

a. 速度コントラストをなくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深を上層と同じ速度に設定）

地表 ▼ (EL. 11.0m)	QG-1aモデル			QG-2aモデル			QG-3aモデル			(出力)		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値			
▼ (EL. -50.0m)												
▼ (EL. -90.0m)	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8	1300	3140	10.7			
▼ (EL. -100m)												
▼ (EL. -144m)												
▼ (EL. -150m)							1550	3320	10.6			
▼ (EL. -200m)												
	1550	3190	200	1590	3220	200	1550	3320	200	(入力)		

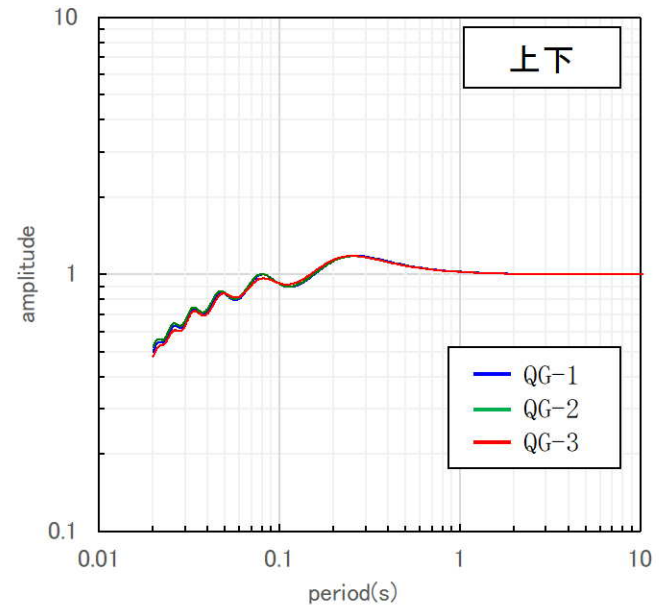
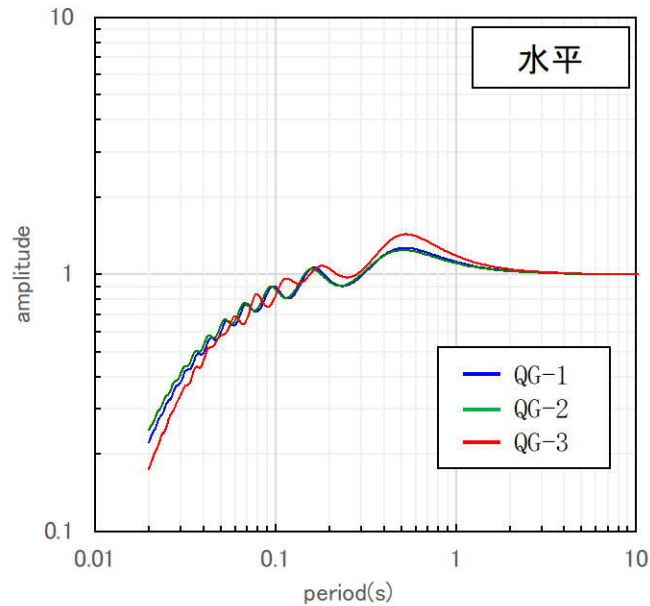
: PS検層モデル (QG-1~3) との相違点

## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

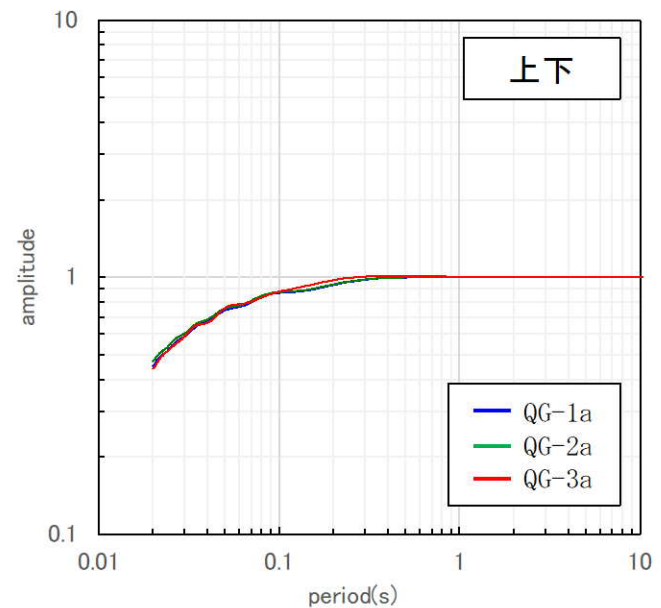
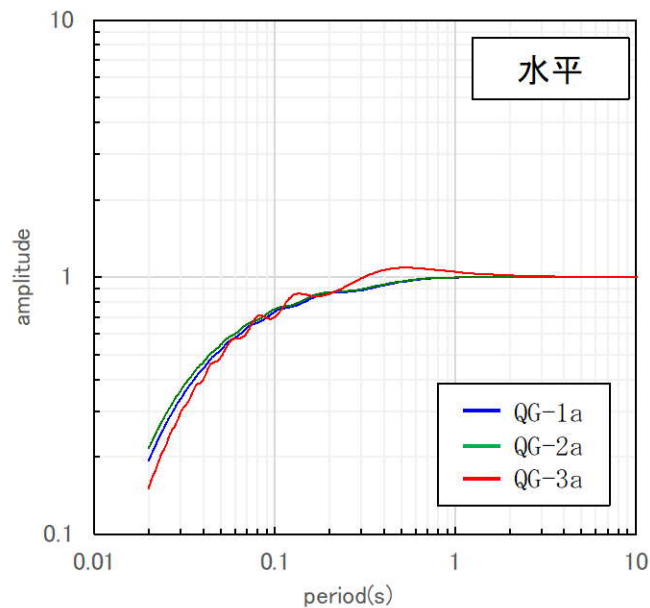
### ■ 伝達関数の比較

- 速度コントラストをなくした結果、一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）における特徴的なピークの解消を確認。

変更前  
(コントラスト有)



変更後  
(コントラスト無)



## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

b. 速度コントラストを大きくした場合（PS検層モデルのEL. -200m以深の速度を大きく設定）

地表 ▼ (EL. 11.0m)	QG-1bモデル			QG-2bモデル			QG-3bモデル			(出力)		
解放基盤表面 ▼ (EL. -15.0m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値			
▼ (EL. -50.0m)												
▼ (EL. -90.0m)	1550	3190	11.3	1590	3220	11.8	1300	3140	10.7			
▼ (EL. -100m)												
▼ (EL. -144m)												
▼ (EL. -150m)							1550	3320	10.6			
▼ (EL. -200m)												
	3100	5500	200	3100	5500	200	3100	5500	200	(入力)		

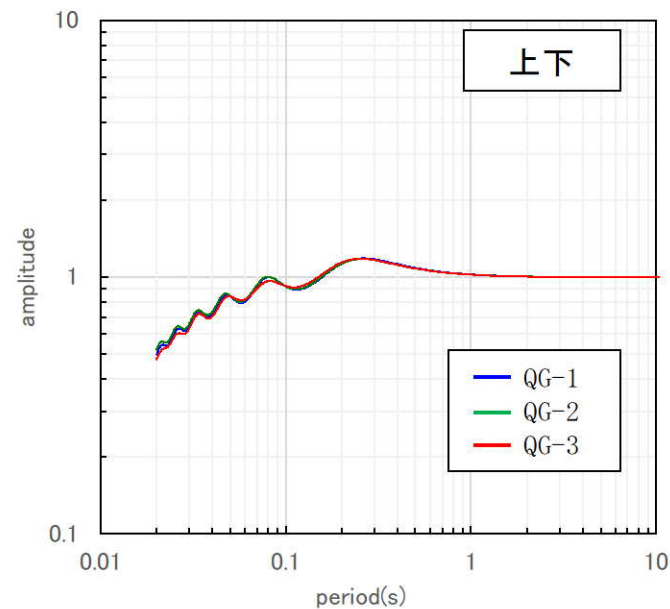
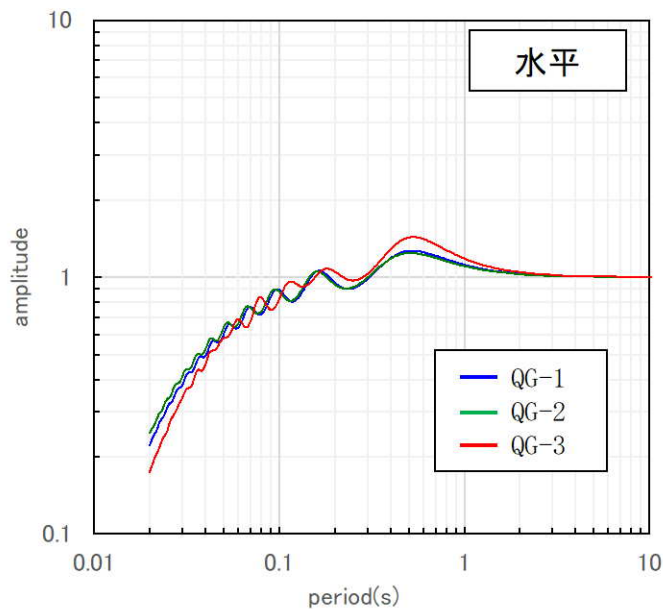
: PS検層モデル (QG-1~3) との相違点

## 2. PS検層モデルに見られるピークの生成要因分析

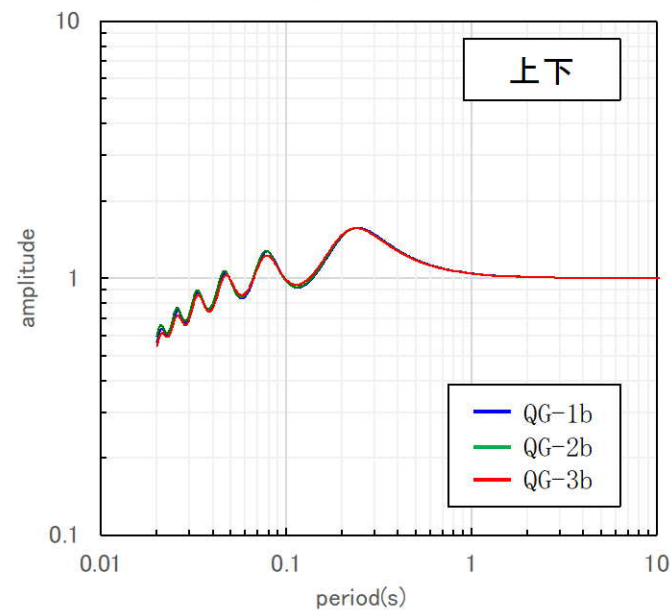
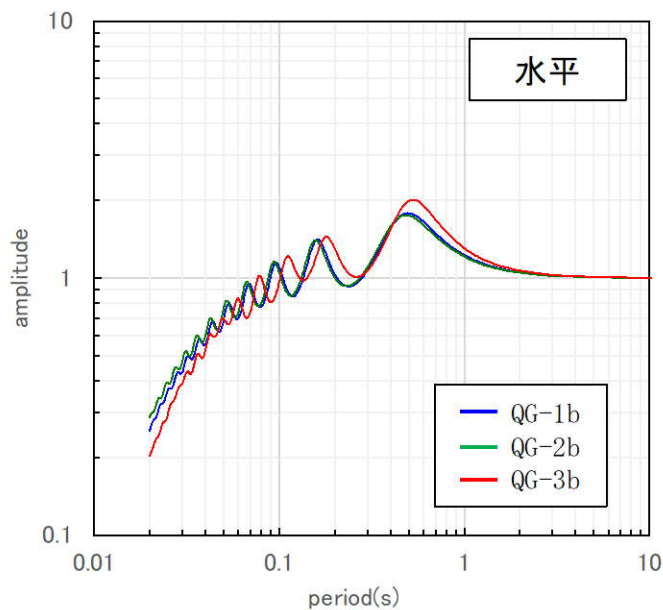
### ■ 伝達関数の比較

- 速度コントラストを大きくした結果、一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）における特徴的なピークの増大を確認。

変更前  
(コントラスト有)



変更後  
(コントラスト大)



### 3. 地下構造モデルの再検討

# 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4 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. -90.0m) 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 $Q=8.7$ 程度。

- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 ( $Q=8.7$ 程度)
- 伝達関数 (バイリニア型) による検討 ( $Q=3.7$ 程度)
- 地震波干渉法による検討 ( $Q=8.6$ 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4 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

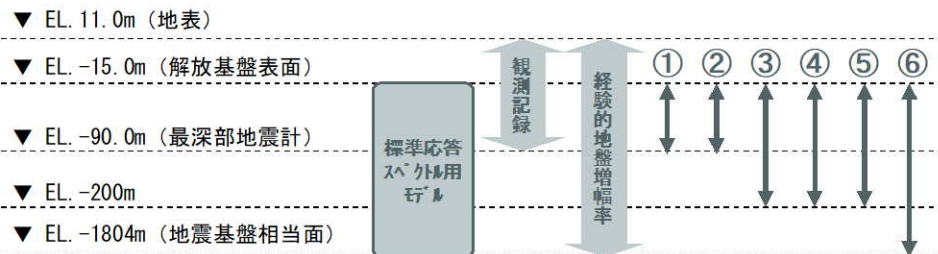
### 地下構造モデルの設定【第1103回審査会合 資料4 2.3節】

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4 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4 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4 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、2つの方法により確認する方針としていたが、下記の通り方針を見直し。
  - (1) 「追加ボーリング調査結果との比較による確認」を「地震観測記録の応答スペクトルによる確認」に見直し
    - PS検層モデルの理論伝達関数（解放基盤表面／EL. -200m）の算出にあたり、EL. -200m以深の設定が必要であり、EL. -200m以深は標準応答スペクトル用モデルを流用。
    - 計算の境界条件（EL-200mでの速度コントラスト）の影響によりピークが生成することを確認したが、EL. -200m以深のデータが無いため、PS検層モデルの理論伝達関数を適切に評価できない。
    - このため、追加ボーリングとの比較による地下構造モデルの妥当性確認は困難であると判断。
    - 地震観測記録の応答スペクトルによる比較により、EL. -90mから解放基盤表面までの範囲の地下構造モデルの妥当性を確認するよう方針を見直し。
  - (2) 「経験的地盤増幅率による確認」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。
      - (2-1) 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。
      - (2-2) 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、19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4 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. -90.0m) 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 $Q=8.7$ 程度。

- 伝達関数 (周波数依存型) による検討 ( $Q=8.7$ 程度)
- 伝達関数 (バイリニア型) による検討 ( $Q=3.7$ 程度)
- 地震波干渉法による検討 ( $Q=8.6$ 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4 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4 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。

□ : 方針見直し箇所

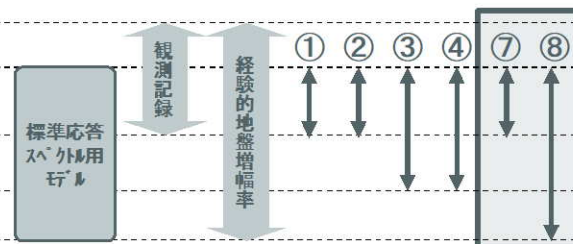
▼ EL. 11.0m (地表)

▼ EL. -15.0m (解放基盤表面)

▼ EL. -90.0m (最深部地震計)

▼ EL. -200m

▼ EL. -1804m (地震基盤相当面)



### 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4 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4 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。

- 設定した地下構造モデル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 (⑦) [EL. -90m～解放基盤表面]
- 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 (⑧) [地震基盤相当面～解放基盤表面]

## 3.2 地下構造モデルの妥当性確認及び今後の検討方針

### ■ 地下構造モデル

- 以下の地下構造モデルの妥当性を次頁以降で確認する。

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					
-15m	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300

## 3.2 地下構造モデルの妥当性確認及び今後の検討方針

### ■ 見直し後の方針に基づく地下構造モデルの妥当性確認結果及び設定

- 地震観測記録の応答スペクトルによる妥当性確認結果【20～30頁参照】
  - 周期帯全体において、水平・上下方向ともに、設定した地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることから、解放基盤表面（EL. -15m）からEL. -90mまでの範囲の地下構造モデルの妥当性を確認。
  - 解放基盤相当（EL. -17m）における地震観測記録の応答スペクトルには、一部の周期帯（水平：周期0.5秒付近）における特徴的なピークが見られないことを確認。
- ブロックインバージョン結果を用いた地震波による妥当性確認結果【31～35頁参照】
  - 地下構造モデル全体の妥当性については、友澤ほか（2021）によるブロックインバージョン結果を用いた地震波による解放基盤相当（EL. -17m）及び解放基盤（EL. -15m）における応答スペクトルの比較により確認。
- 地下構造モデルの設定
  - EL. -90m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ことを踏まえ、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Q=16.7に見直し。【37～38頁参照】

地震計位置 ▽EL. 11.0m	地下構造モデル (現行)	地下構造モデル (検討後)	
		Vs	Q値
地表			
解放基盤表面			
▽EL. -15m	1350	12.5	12.5
▽EL. -17m			
▽EL. -50m			
▽EL. -90m	1570	12.5	12.5
▽EL. -100m			16.7
	1730	12.5	16.7
▽EL. -150m			
	1770	12.5	16.7
▽EL. -200m			
	2100	200	200
地震基盤相当面			
▽EL. -1804m	3100	300	300

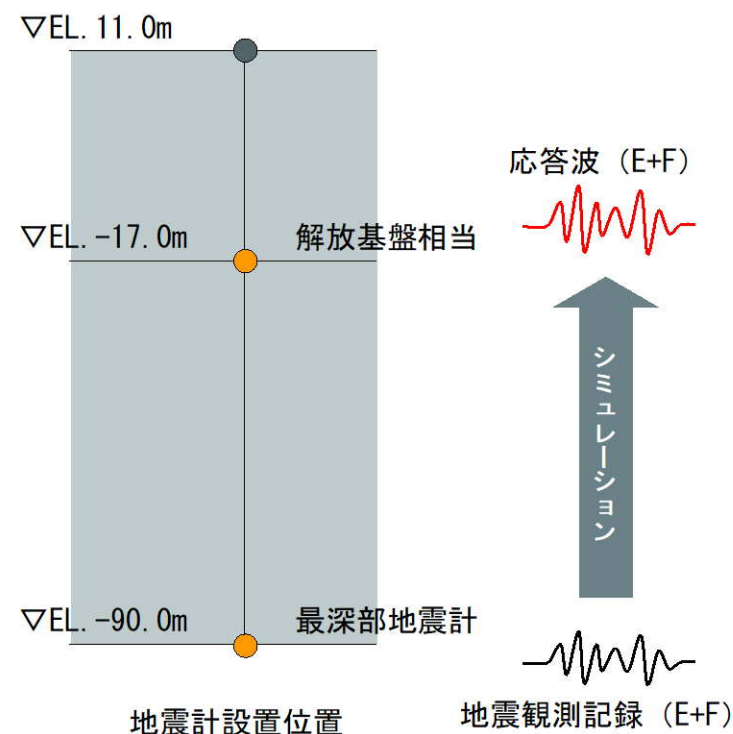


### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 最深部地震計 (EL. -90m) 以浅の範囲における地下構造モデルの妥当性確認

- 最深部地震計 (EL. -90m) 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. -17m) 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. -15m) からEL. -90mまでの範囲における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。
  - 解放基盤相当 (EL. -17m) における地震観測記録の応答スペクトルには、一部の周期帯 (水平: 周期0.5秒付近) における特徴的なピークが見られないことを確認。

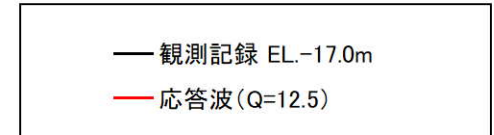
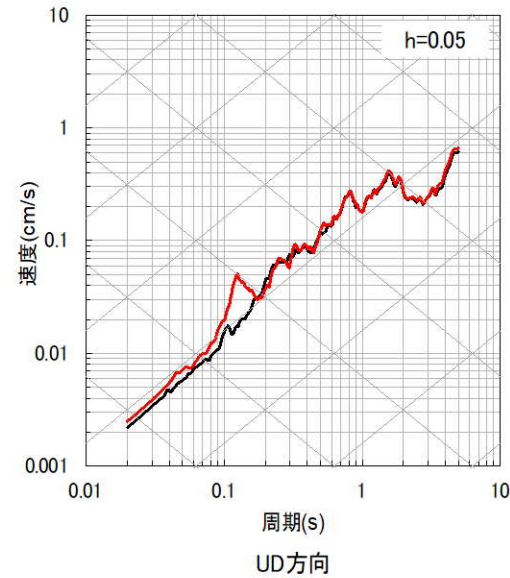
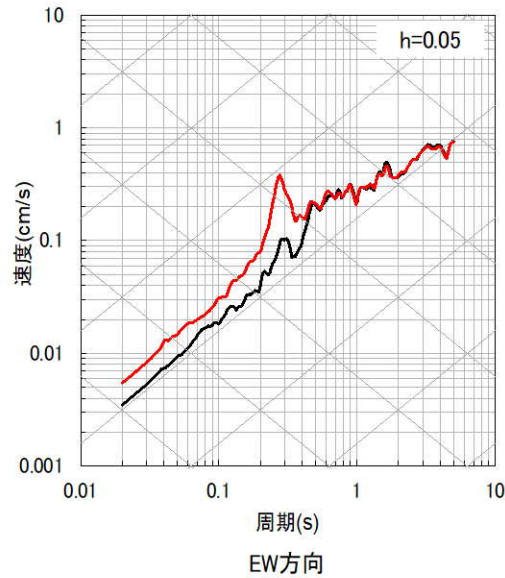
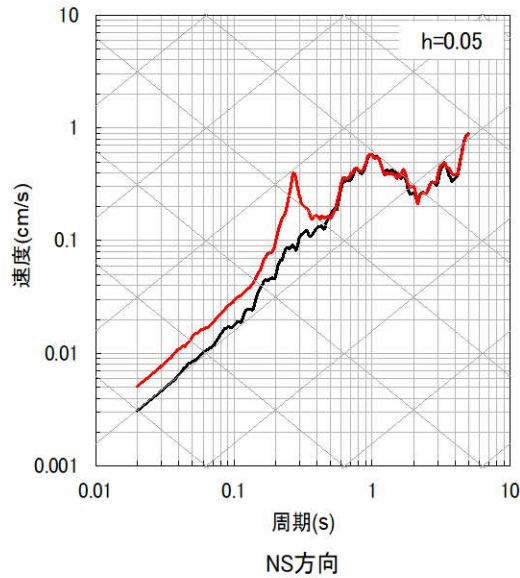
※入力の最深部地震計 (EL. -90m) で得られた地震観測記録及び出力の解放基盤相当 (EL. -17m) での応答波は地中記録のため、E+Fで評価。



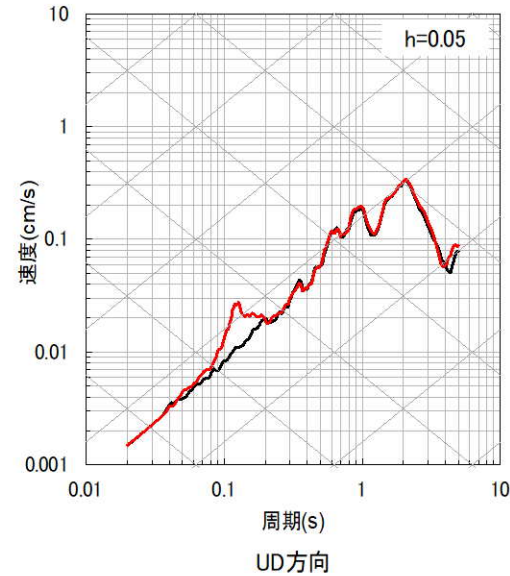
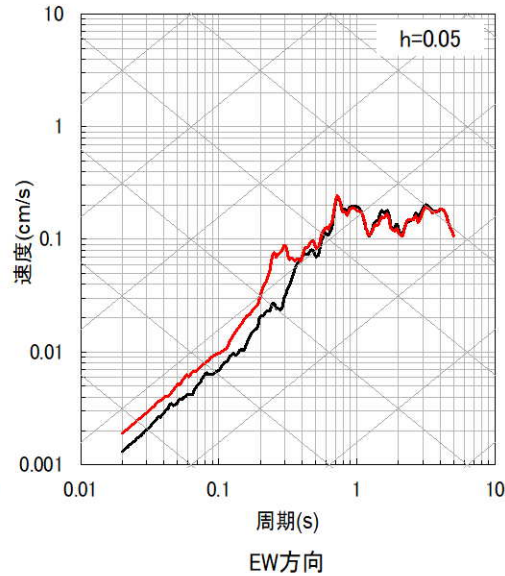
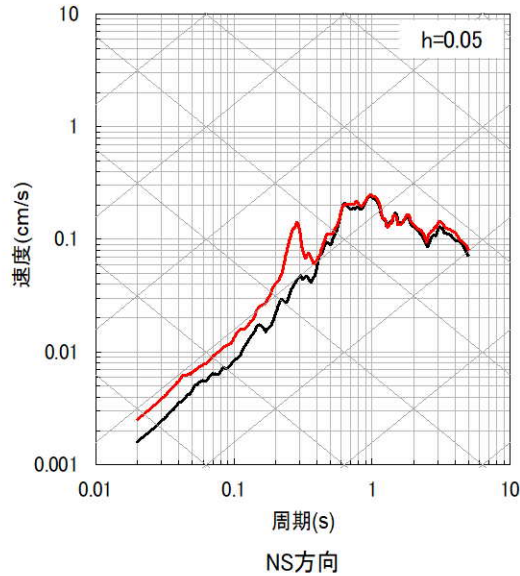
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

##### ① 鹿児島県北西部



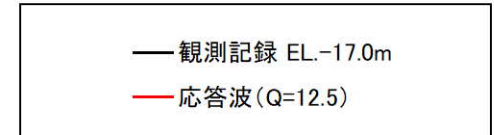
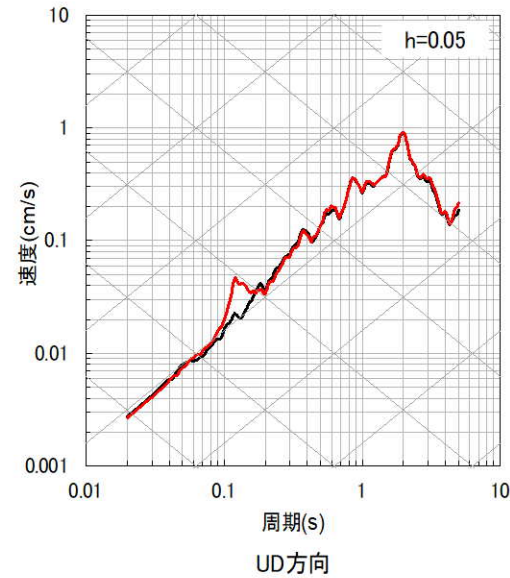
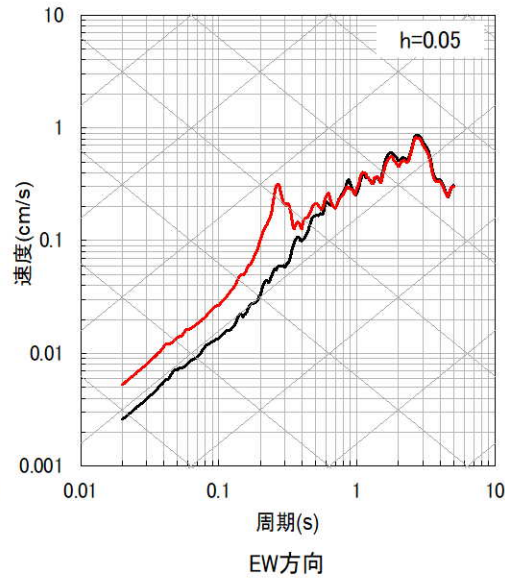
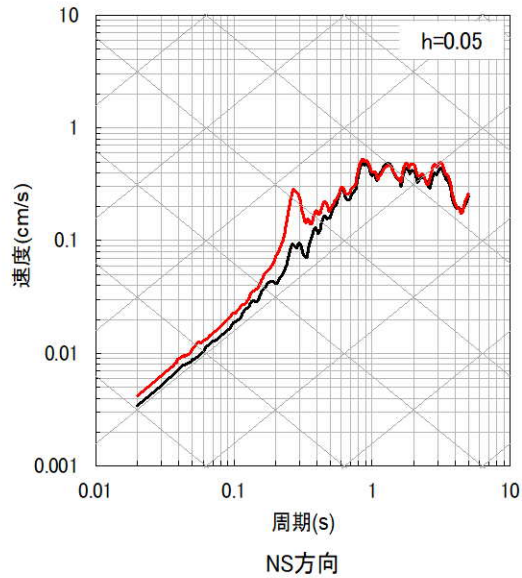
##### ② 鹿児島県北西部



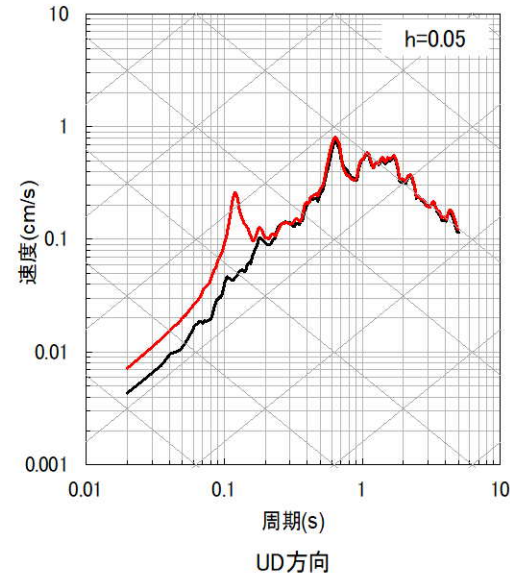
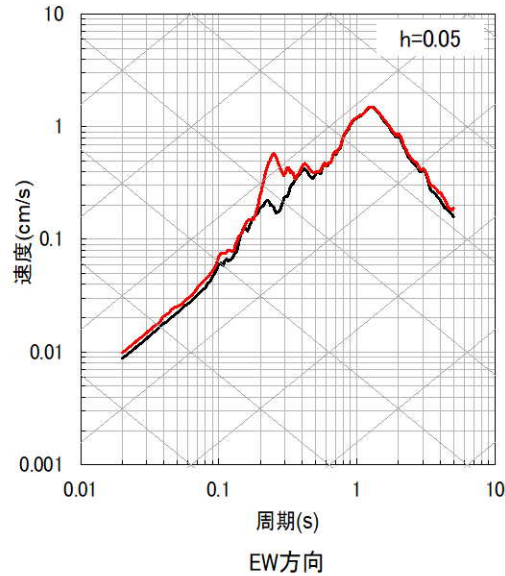
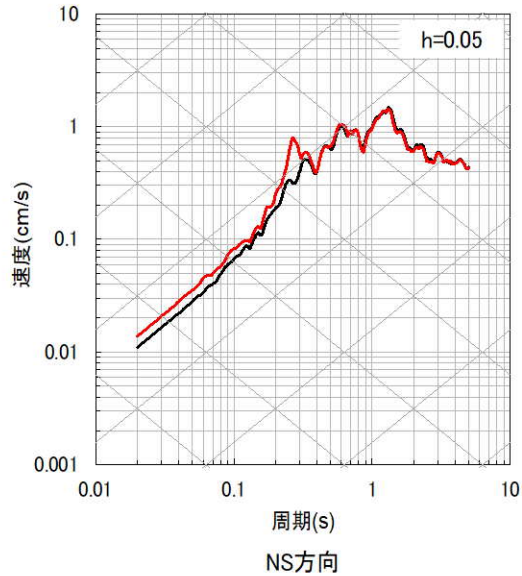
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

##### ③ 鹿児島県北西部



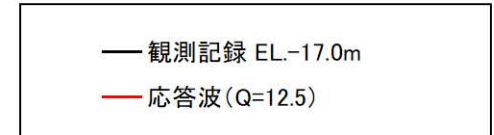
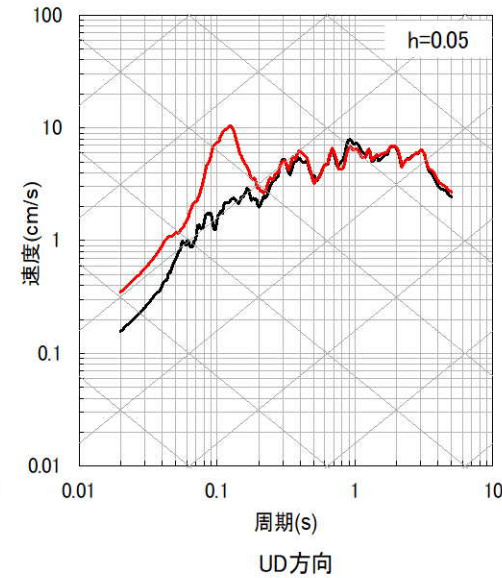
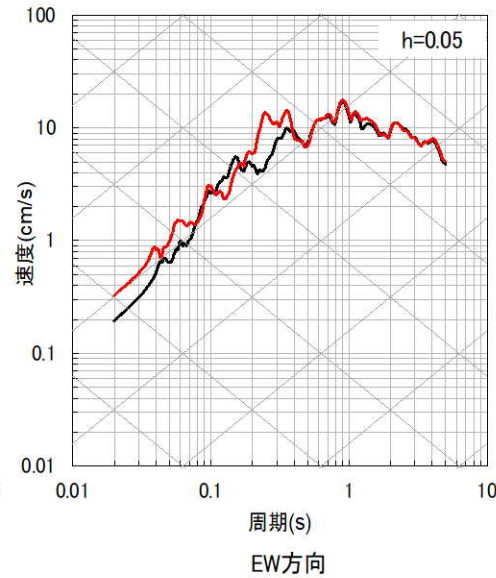
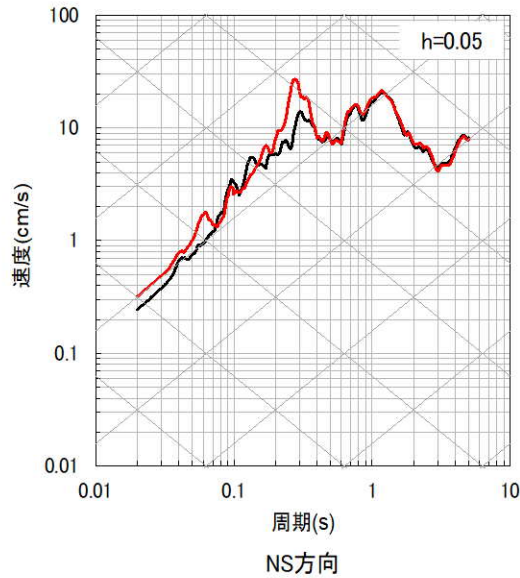
##### ④ 山口県



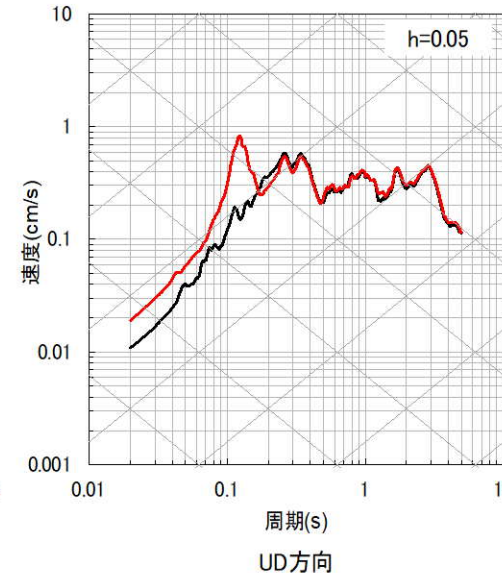
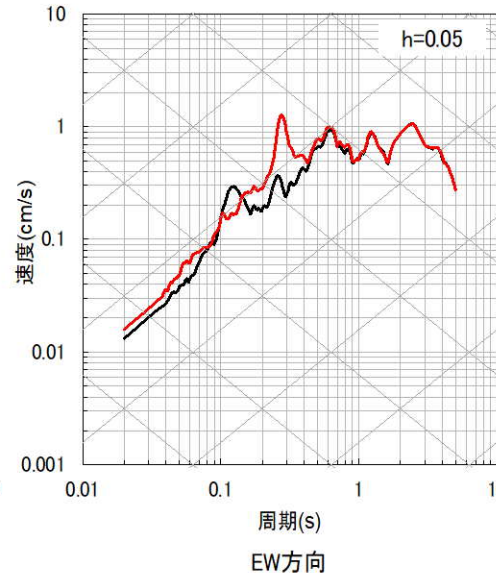
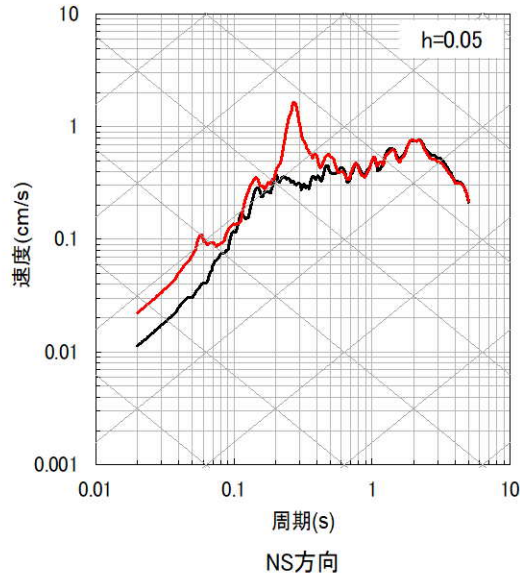
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

##### ⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



##### ⑥九州北西沖

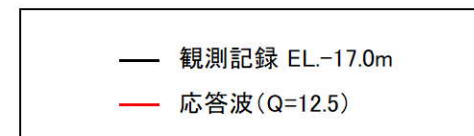
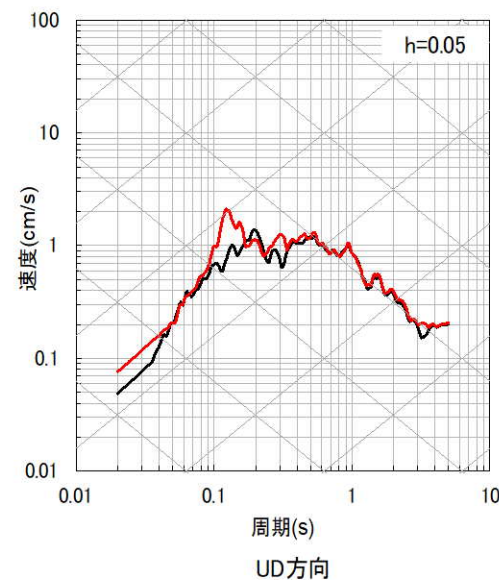
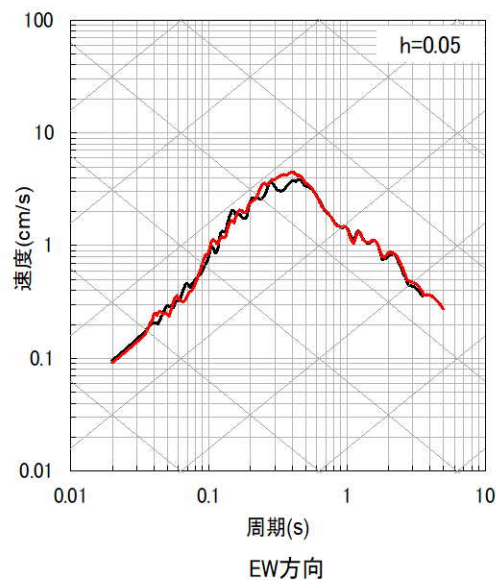
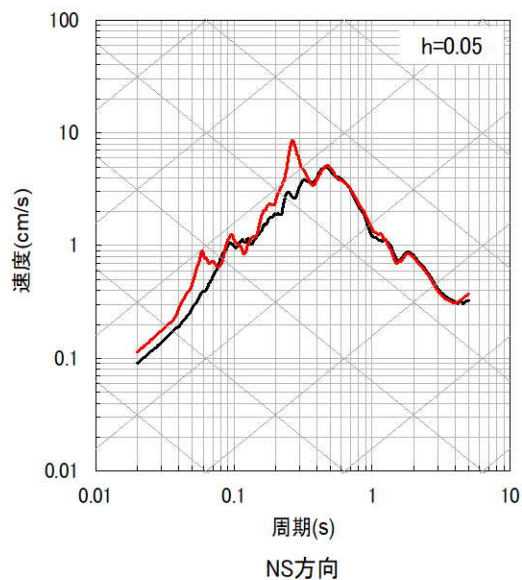




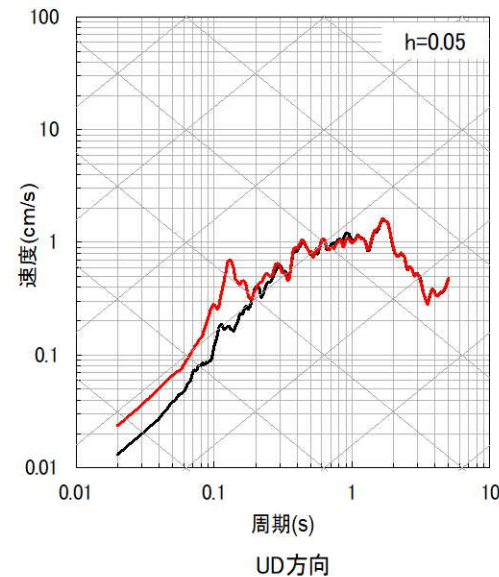
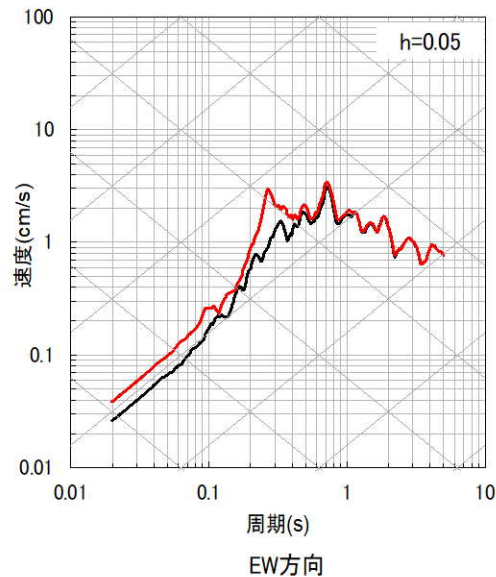
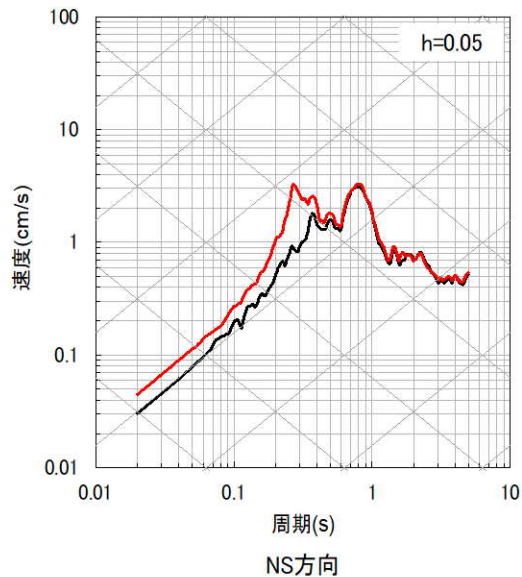
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

##### ⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



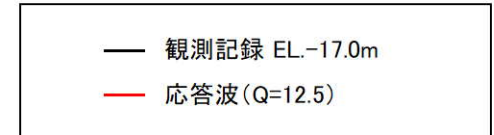
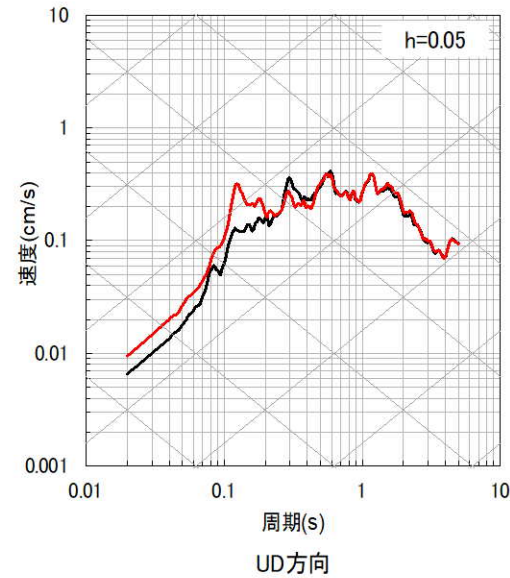
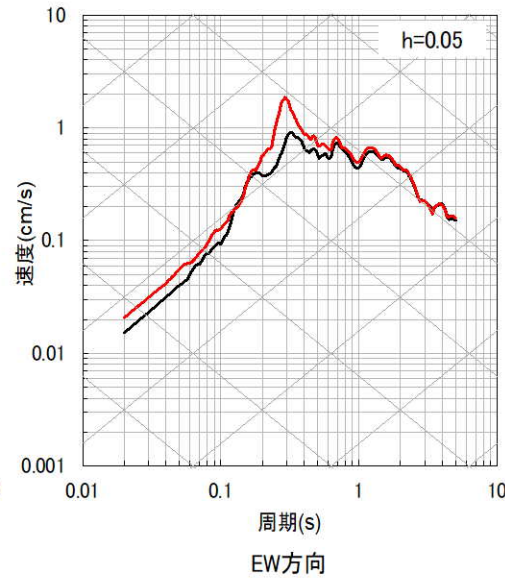
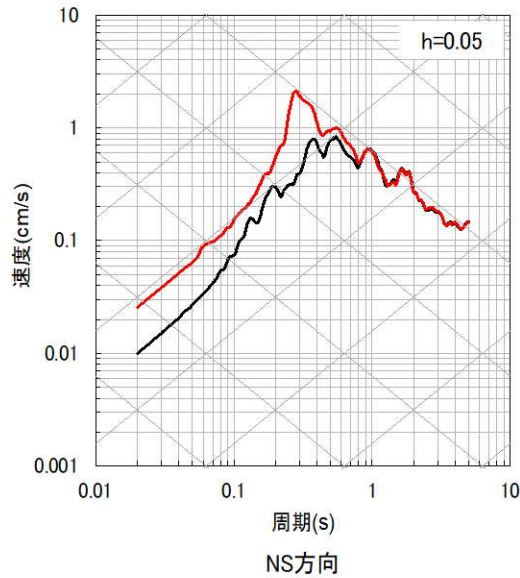
##### ⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



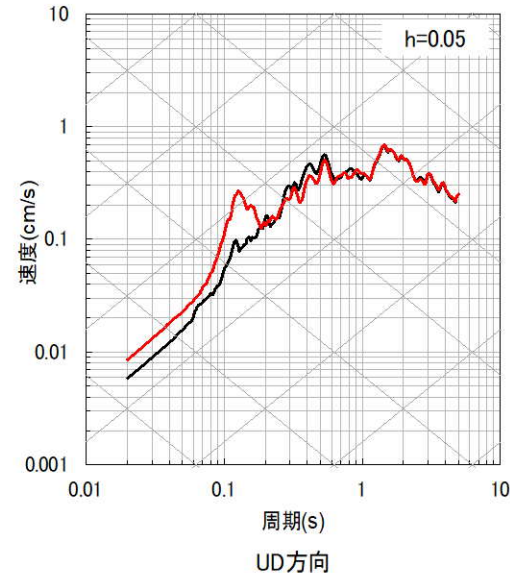
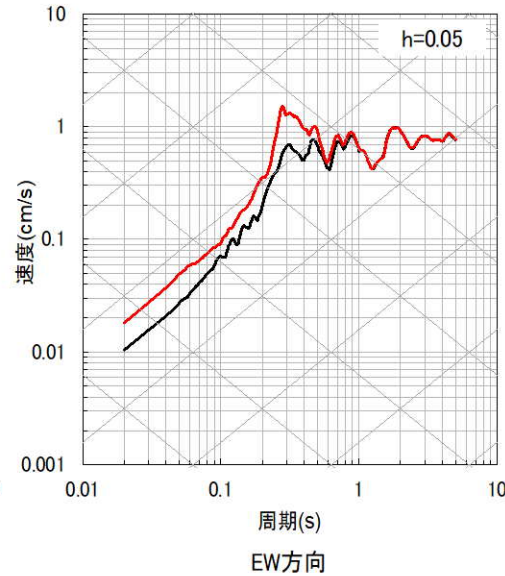
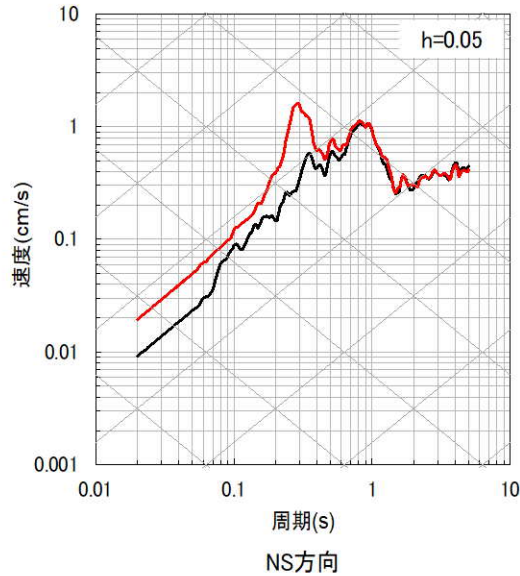
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

##### ⑨ 熊本県熊本地方



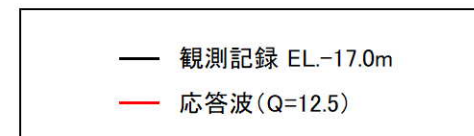
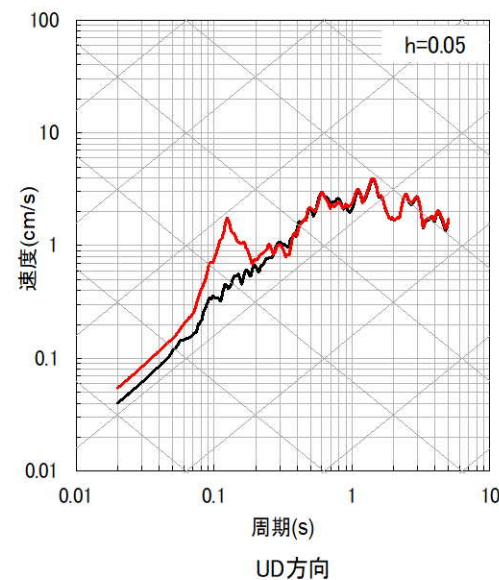
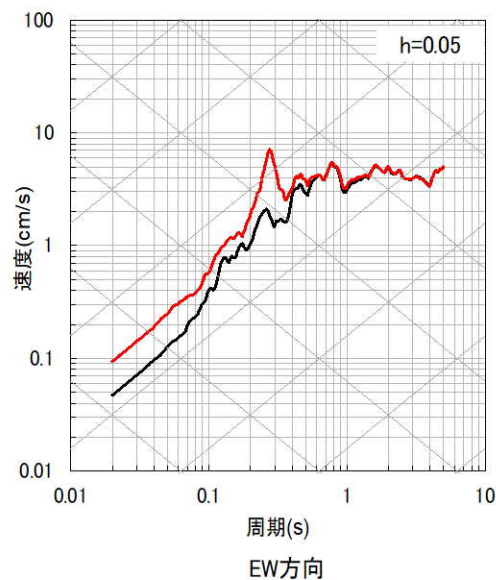
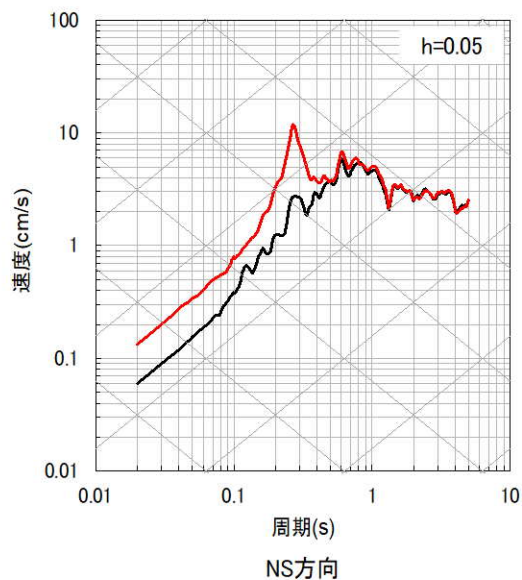
##### ⑩ 熊本県熊本地方



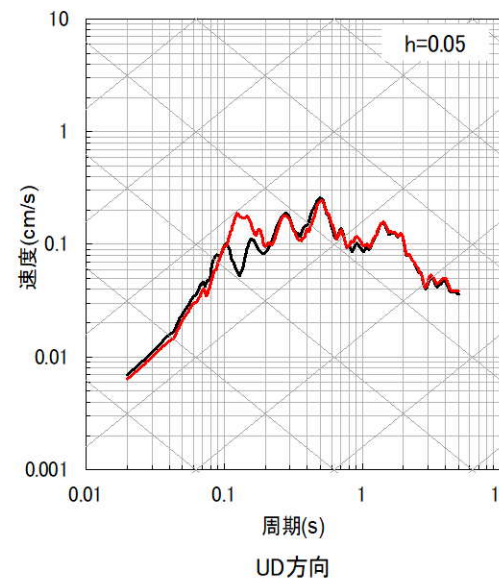
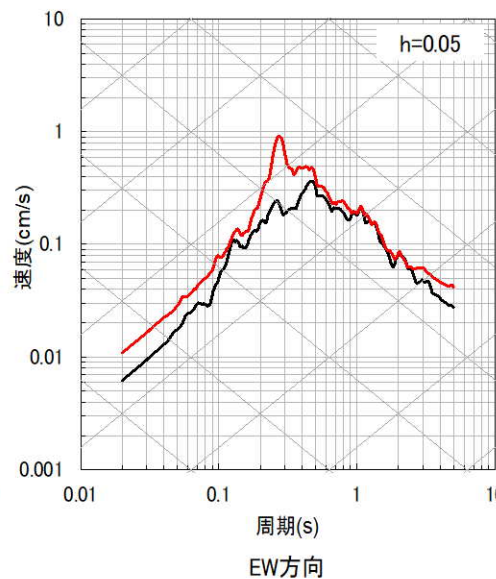
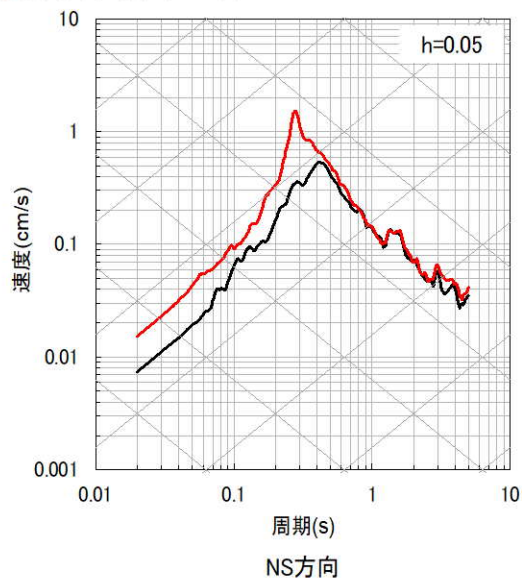
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

##### ⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



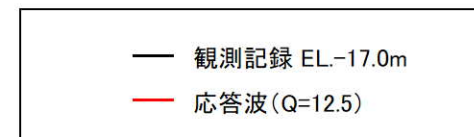
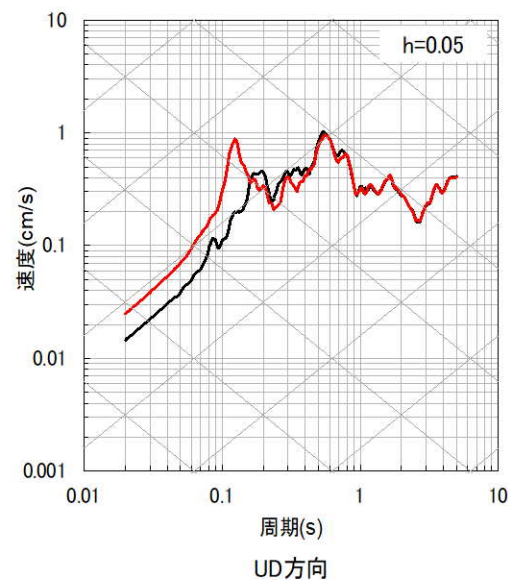
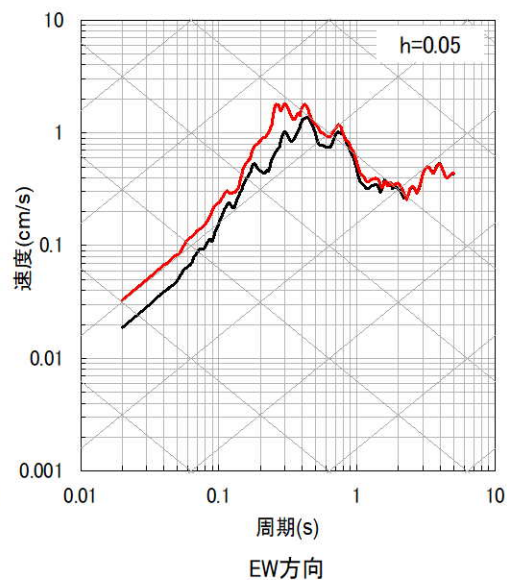
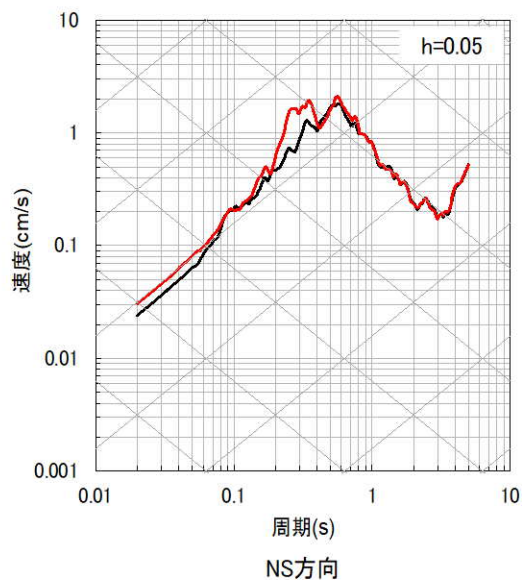
##### ⑫ 熊本県熊本地方



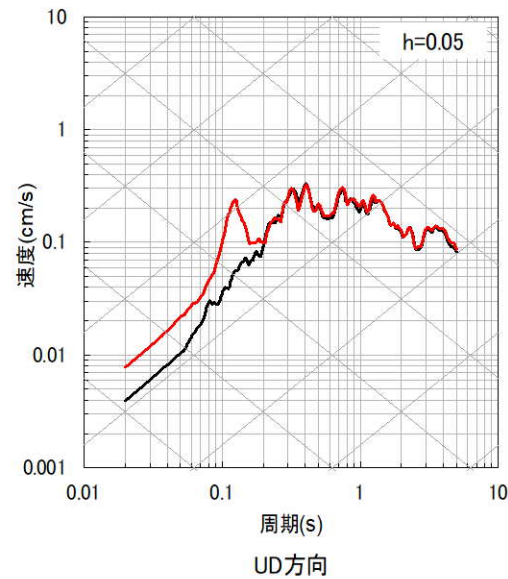
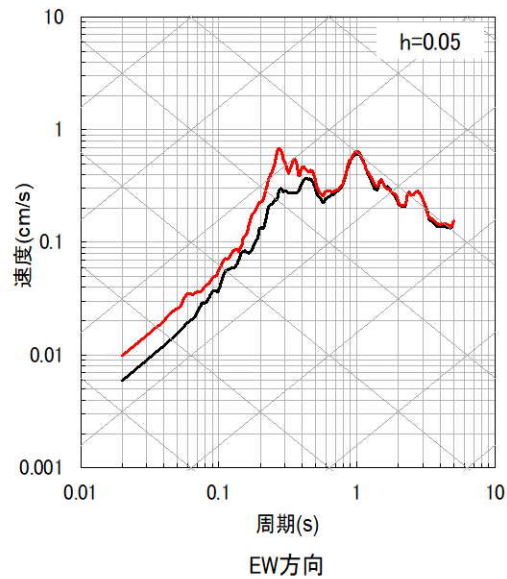
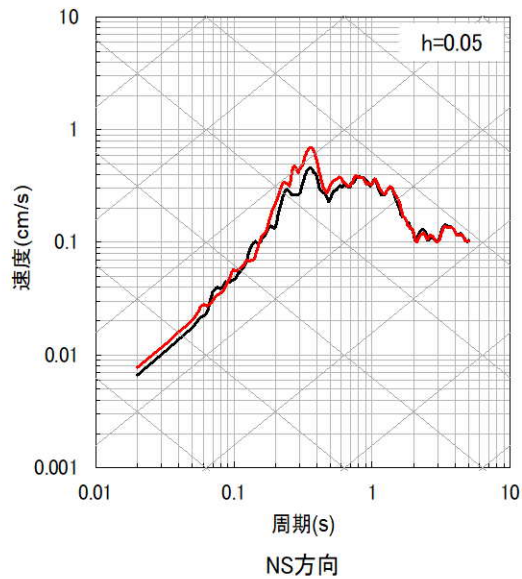
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

##### ⑬ 熊本県熊本地方



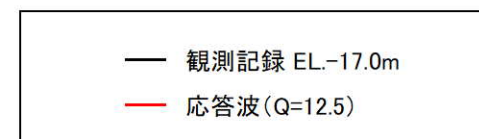
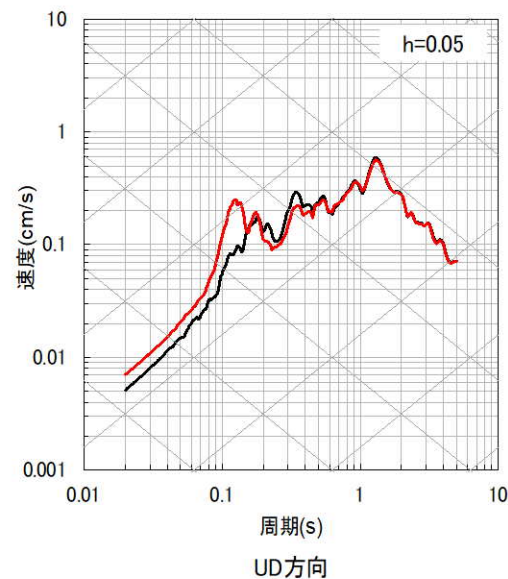
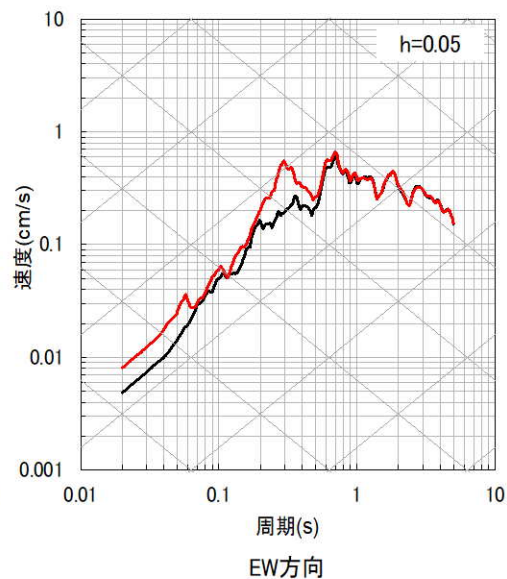
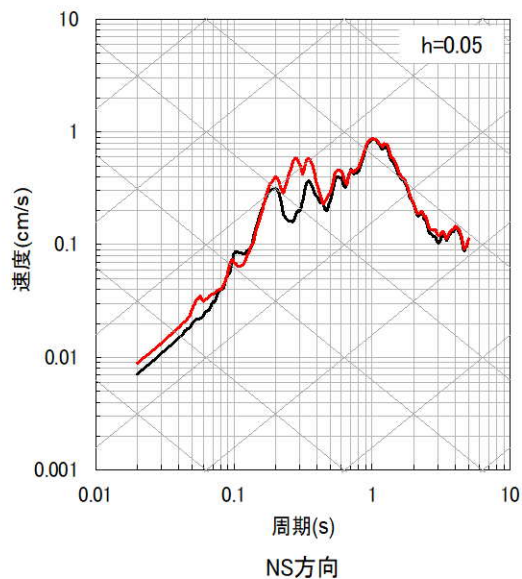
##### ⑭ 熊本県阿蘇地方



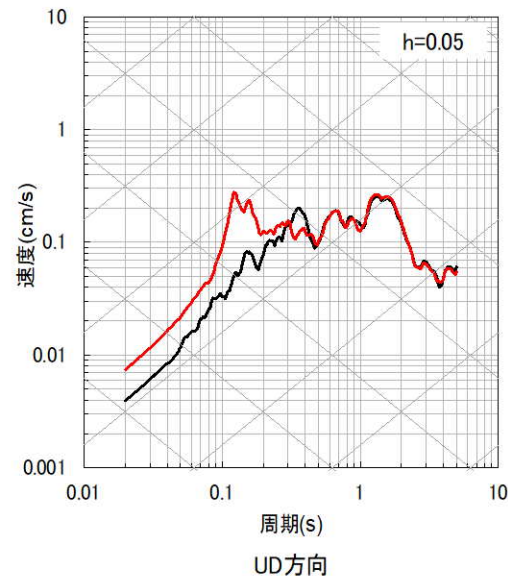
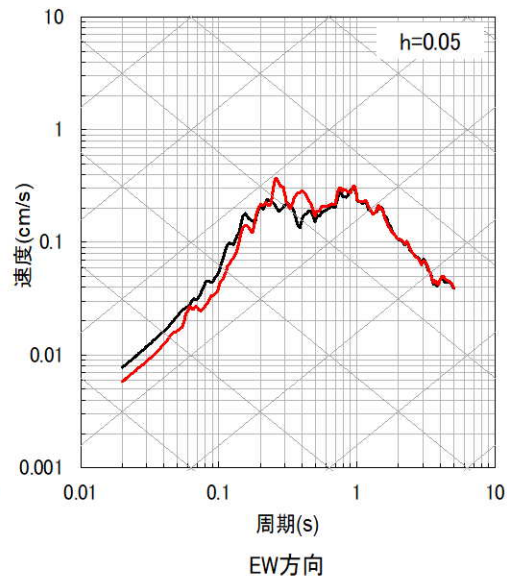
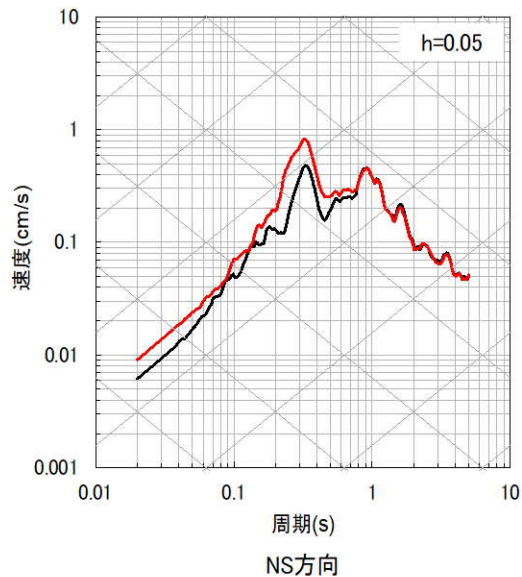
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

##### ⑮ 熊本県阿蘇地方



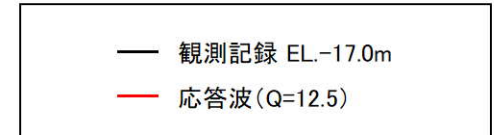
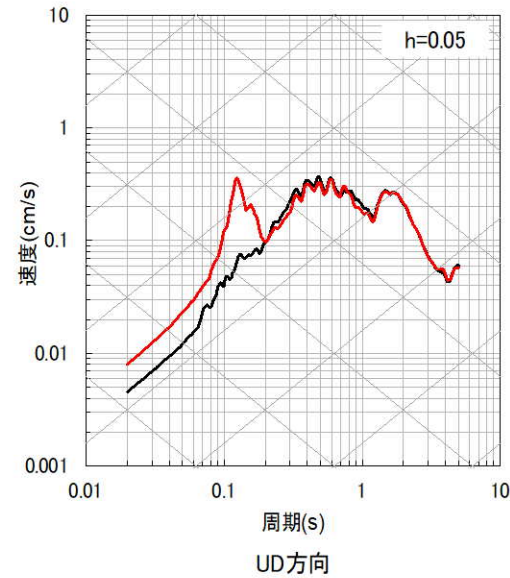
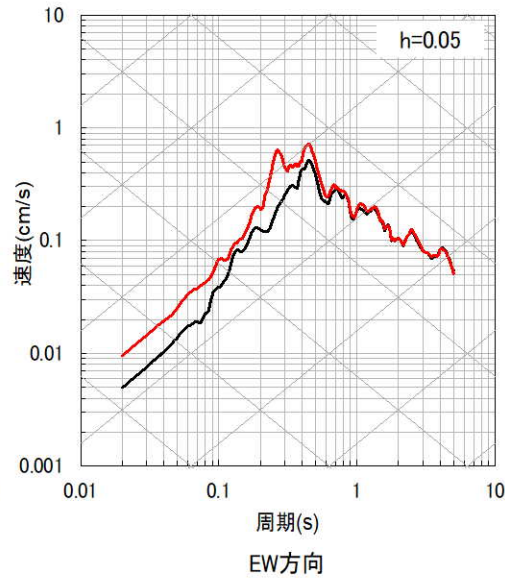
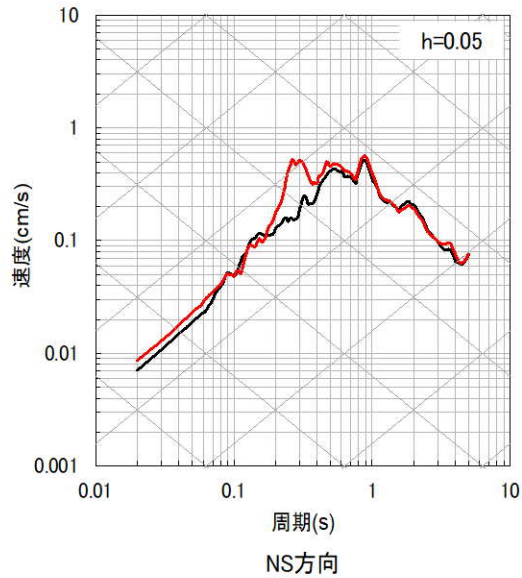
##### ⑯ 熊本県熊本地方



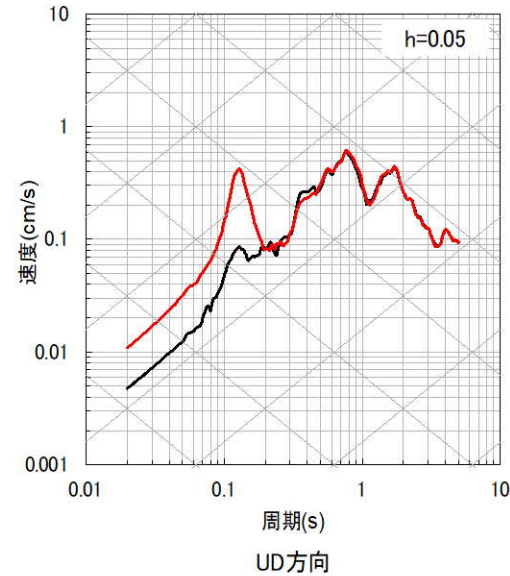
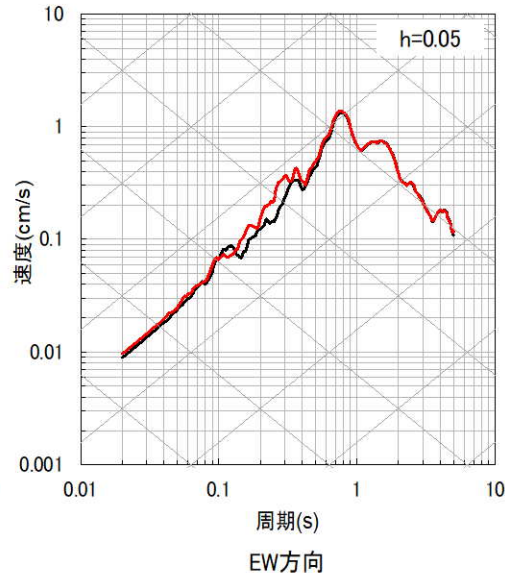
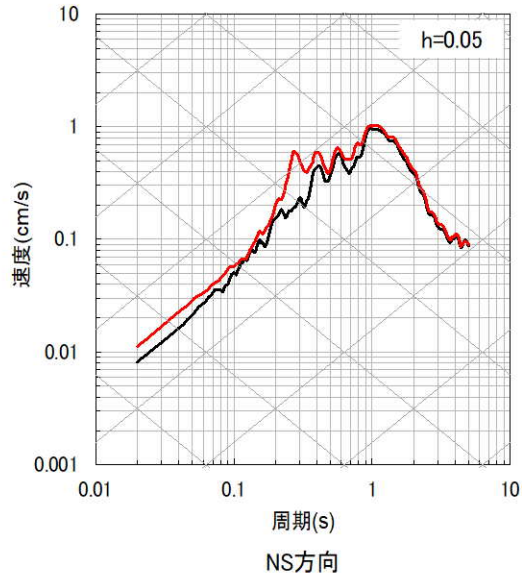
### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

##### ⑰ 熊本県熊本地方



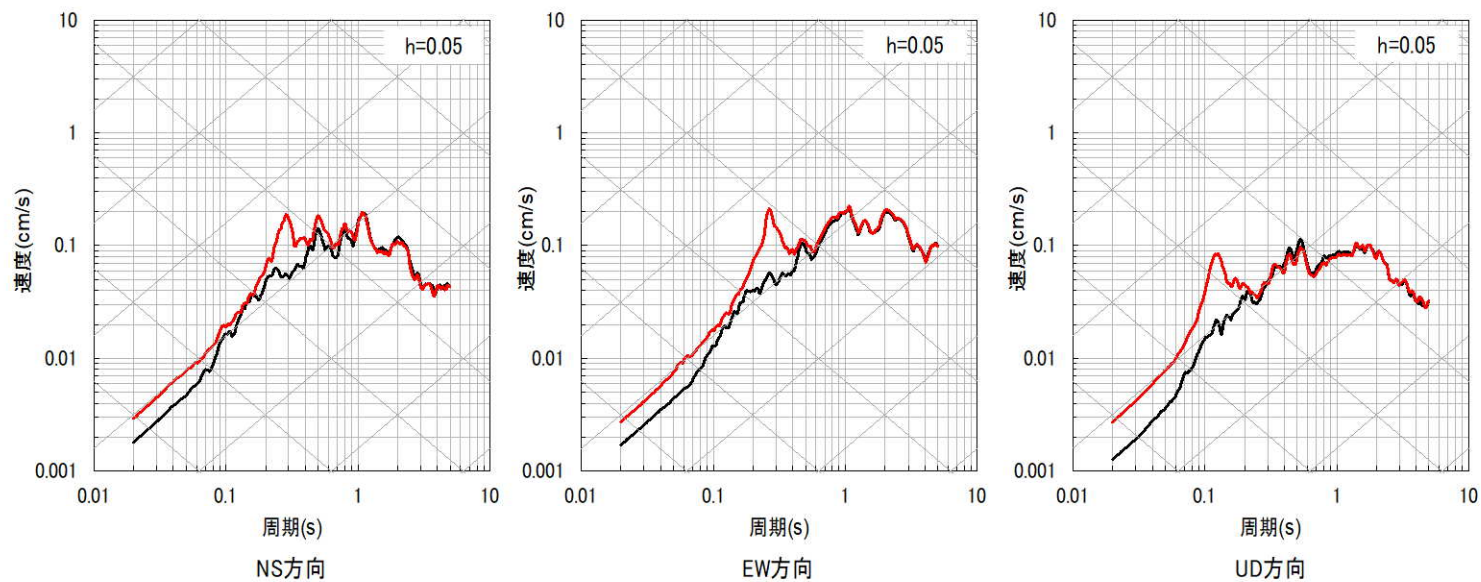
##### ⑱ 熊本県阿蘇地方



### 3.3 最深部地震計以浅の地下構造モデルの妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

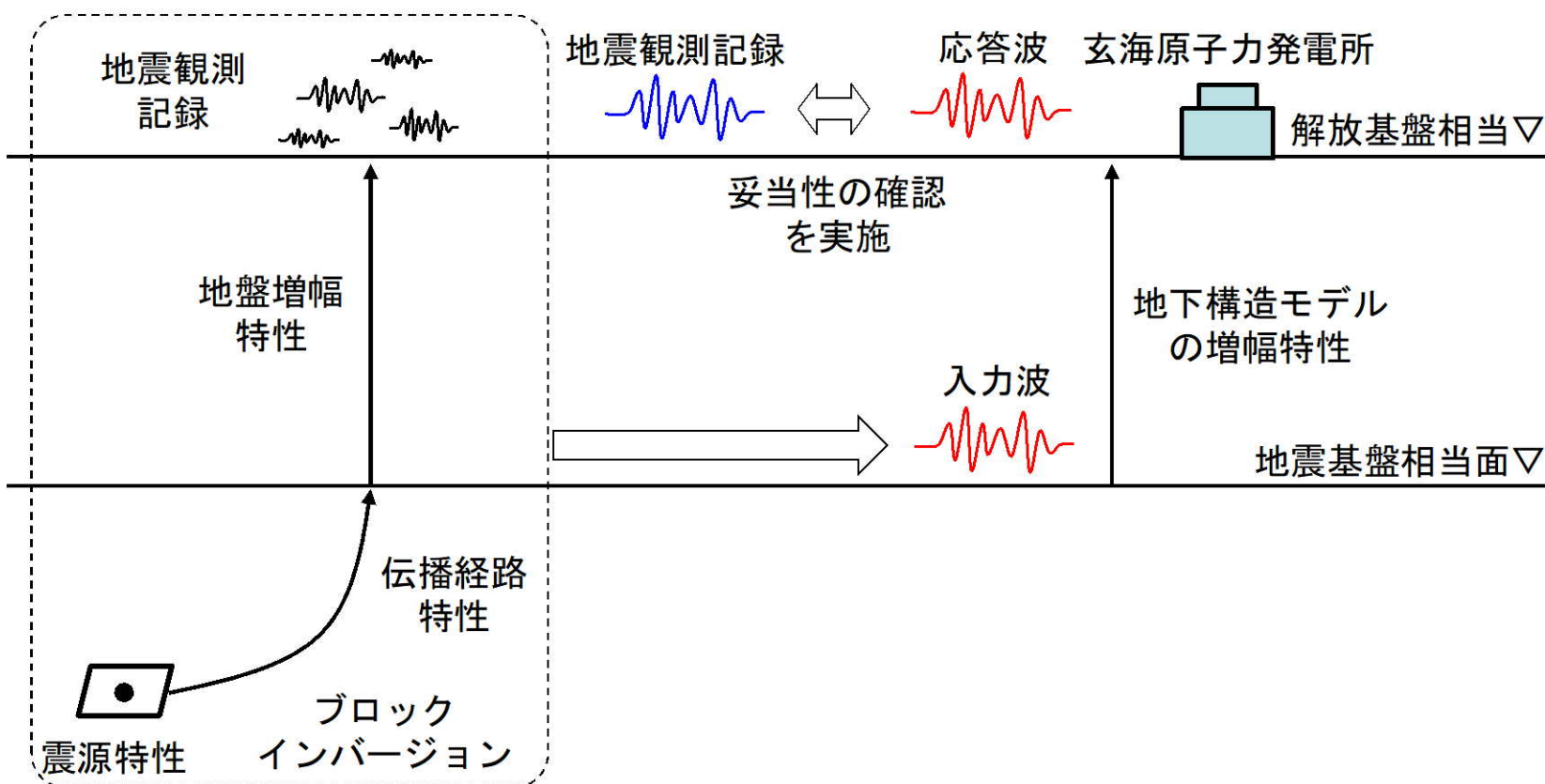
##### ⑬ 熊本県熊本地方



### 3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認

#### ■ 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。



地下構造モデル (現行)

解放基盤表面 ▽EL. -15m	Vs	Q値
▽EL. -50m	1350	12.5
▽EL. -100m	1570	12.5
▽EL. -150m	1730	12.5
▽EL. -200m	1770	12.5
地震基盤相当面 ▽EL. -1804m	2100	200
	3100	300

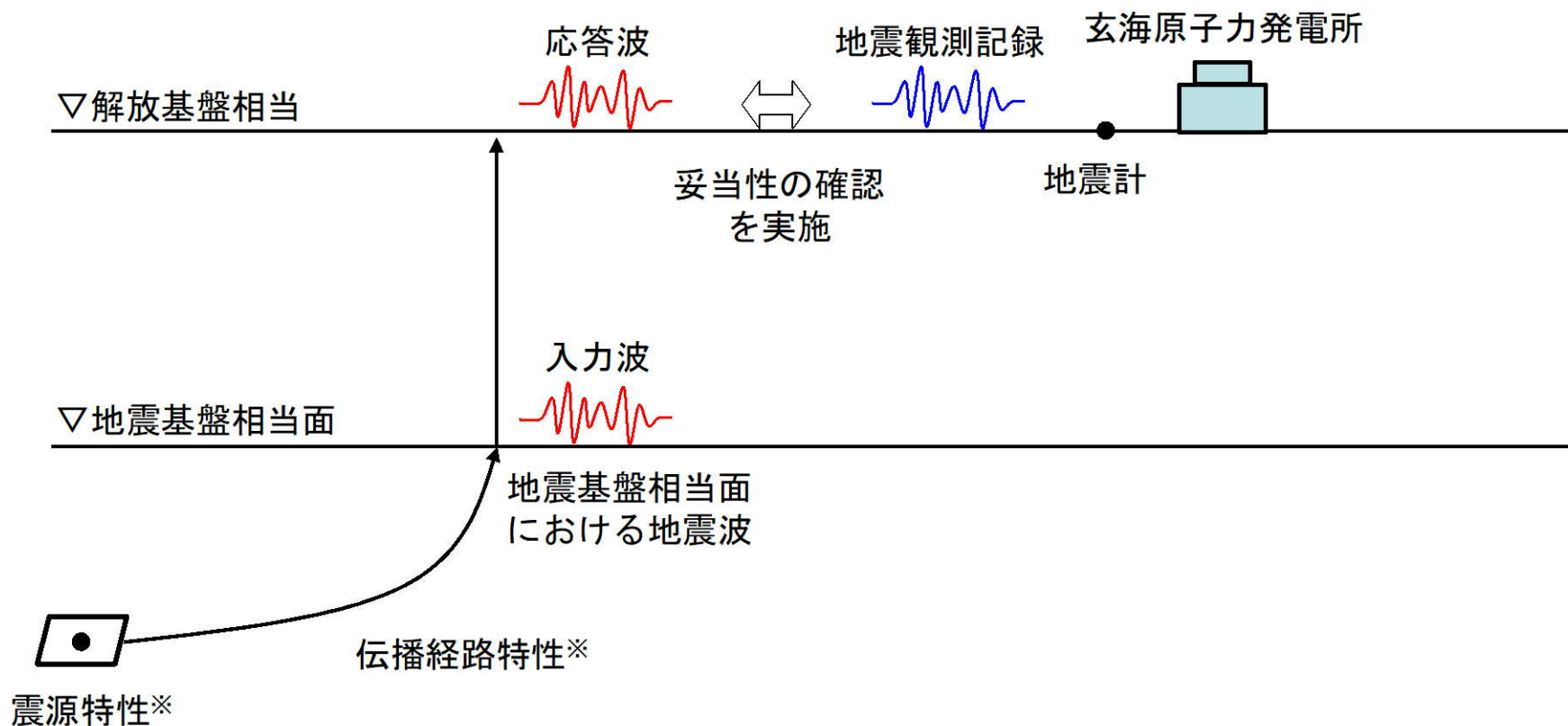
ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認のイメージ



### 3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認

#### ■ ブロックインバージョン結果を用いた地震波の作成

- 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。



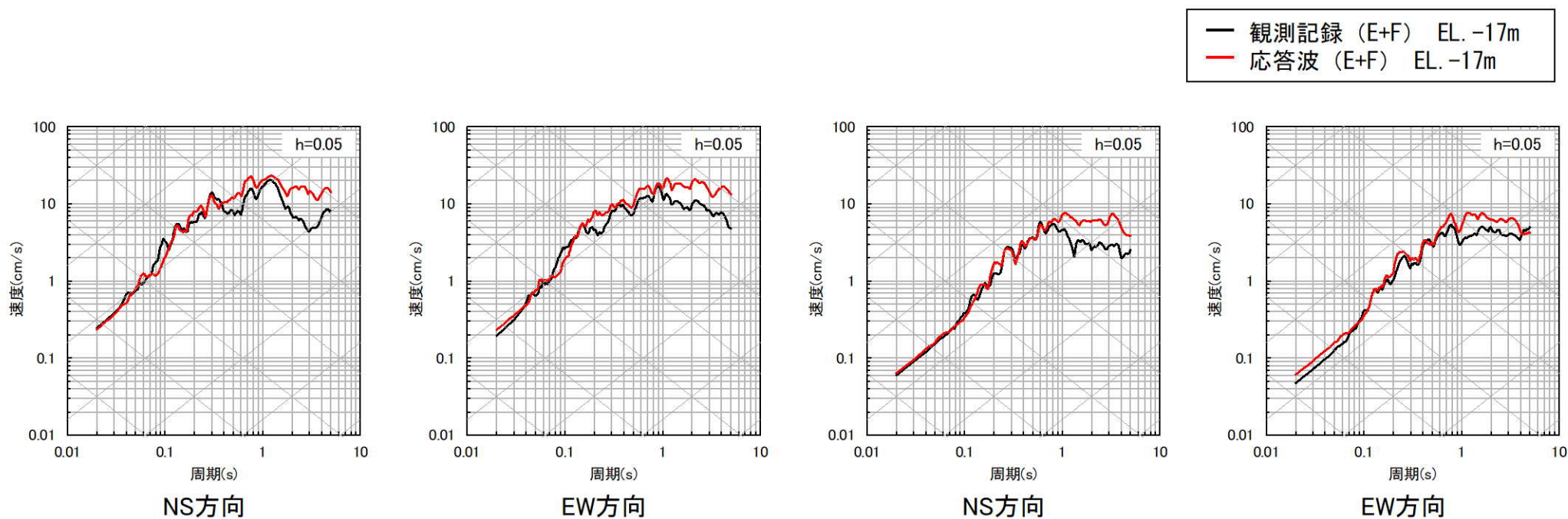
※友澤ほか(2021)によるブロックインバージョン結果

地下構造モデル全体の妥当性確認のイメージ

## 3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認

### ■ 応答スペクトルによる確認

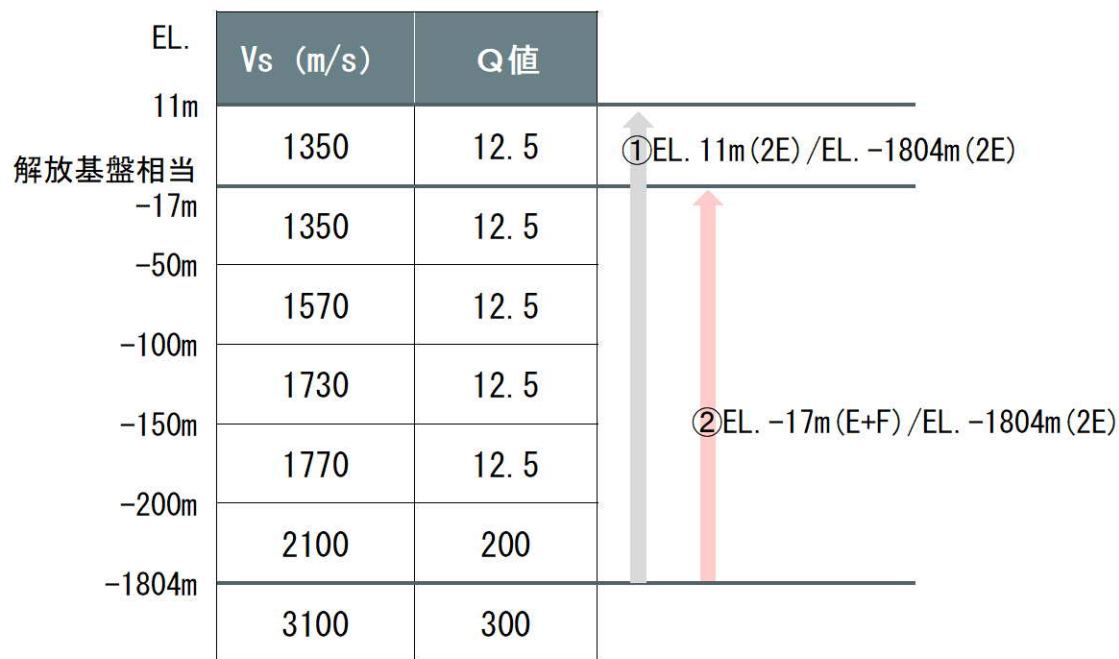
- 敷地で観測された地震のうち規模の大きな地震である、2005年3月20日福岡県西方沖地震本震および2016年4月16日熊本県熊本地震本震（水平）を用いて、解放基盤相当位置（EL. -17m）での応答波と観測記録の応答スペクトルによる比較を実施。
- 比較の結果、地下構造モデルを用いた応答波は、観測記録を同等もしくは上回ることを確認。
- なお、一部の周期帯（0.1秒付近）において、応答波が観測記録を下回ることについては、次頁で要因を分析。



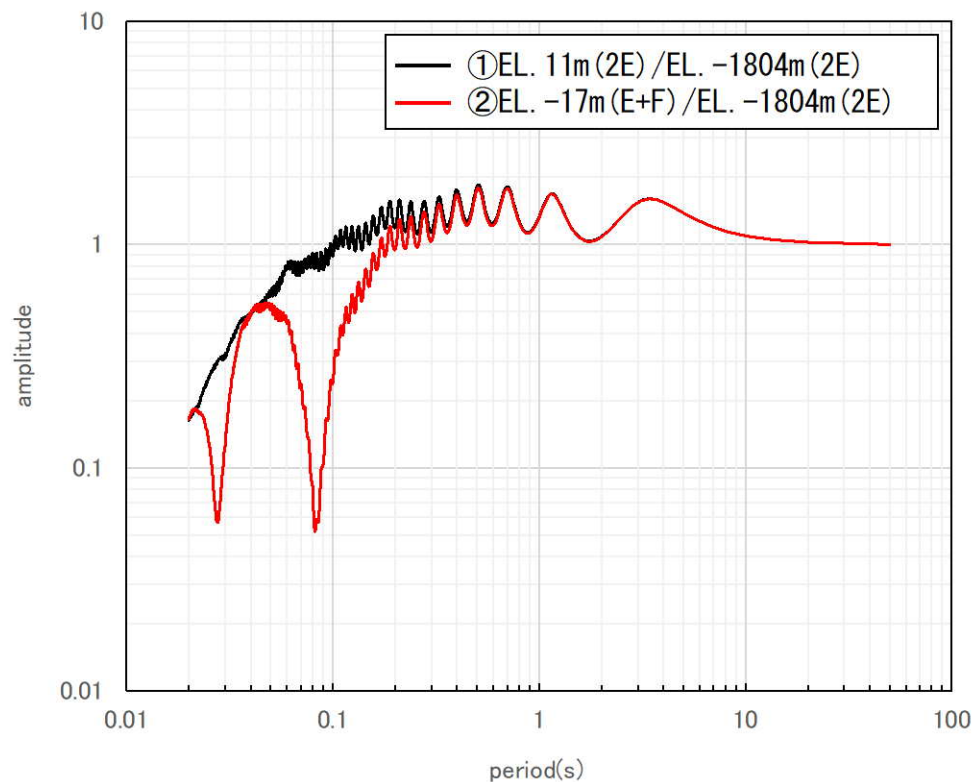
### 3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認

#### ■ 理論伝達関数の比較

- 前頁では、解放基盤相当 (EL. -17m) のE+F波で比較しているため、表層からの反射波の影響が含まれる。
- 反射波の影響を確認するため、①EL. -1804m (2E) と地表 (2E) の理論伝達関数、②EL. -1804m (2E) と解放基盤相当 (E+F) の理論伝達関数を比較すると、②では0.1秒付近に反射波による大きなトラフが存在するが、①では存在しない。
- 以上より、前頁の解放基盤相当の応答波 (E+F) は、反射波の影響による0.1秒の大きなトラフにより、0.1秒付近において地震波が増幅されず、応答波 (E+F) が観測記録 (E+F) を下回る結果になったと考えられるため、次頁で反射波の影響を受けていない解放基盤表面 (EL. -15m) において算出した応答波 (2E) で比較。



※解放基盤表面 (EL. -15.0m) 上に層を追加

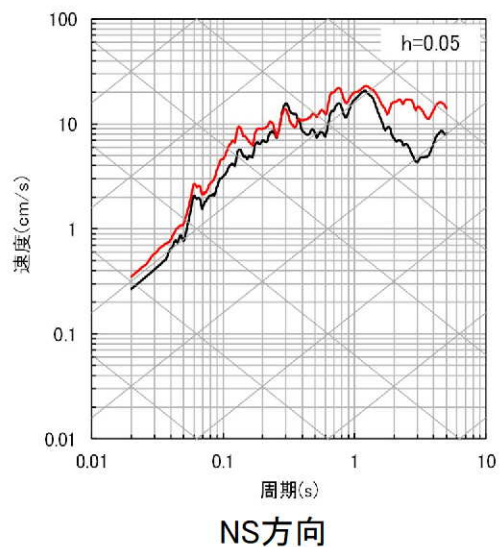


理論伝達関数

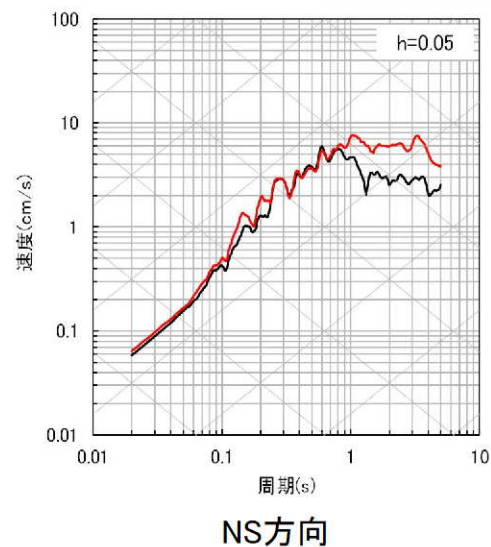
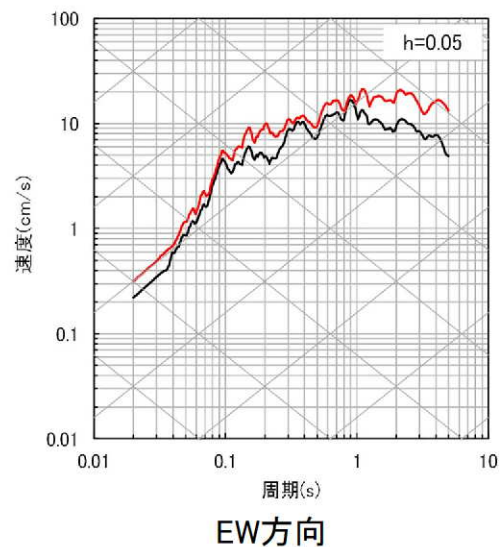
### 3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認

#### ■解放基盤表面の応答波（EL. -15m）と地表観測記録（EL. 11m）の応答スペクトル（2E波）の比較

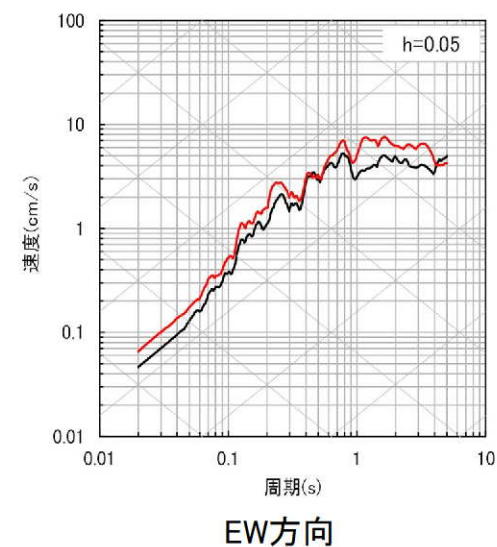
- 既許可の断層モデルを用いた手法における経験的グリーン関数法による地震動評価と同様に、地表観測記録（EL. 11m）を解放基盤表面（EL. -15m）の2E波と見なして比較を実施。
- 地表面（EL. 11m）における観測記録の応答スペクトル（2E波）と、解放基盤表面（EL. -15m）における応答波の応答スペクトル（2E波）を比較した結果、観測記録と同等もしくは上回ることを確認。



2005年3月20日福岡県西方沖地震本震



2016年4月16日熊本県熊本地震本震



## 4. 地下構造モデルの設定

## 4. 地下構造モデルの設定

### ■ 地盤減衰（Q値）の見直し

- 地下構造モデル全体の妥当性は、「3.4 地下構造モデル全体の妥当性確認」にて確認。
- 以下を踏まえ、EL. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）は、更に余裕を持たせた $Q=16.7$ に見直し。
  - 解放基盤表面からEL. -90m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. -90m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. -90m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. -90mからEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（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. -15.0m	地震観測記録	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>
最深部地震計 ▼ EL. -90.0m		
	速度層断面・ボーリング孔内減衰測定等	以下の確認に基づき、EL. -90m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>
▼ EL. -200m		
▼ EL. -1804m		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

### ■ 標準応答スペクトル用モデルの見直し

- 前頁を踏まえ、EL. -90m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 $Q=16.7$ に見直す。

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)

(見直し後)

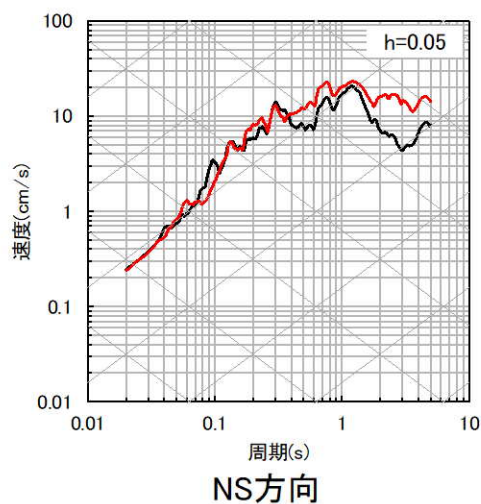
EL.	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値	層上面 (km)	密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
解放基盤表面										
-15m	0.0	2.35	1350	3000	12.5	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m						-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-90m	-0.035	2.35	1570	3440	12.5	-0.075	2.35	1570	3440	16.7
-100m	-0.085	2.35	1730	3470	12.5	-0.085	2.35	1730	3470	16.7
-150m	-0.135	2.35	1770	3650	12.5	-0.135	2.35	1770	3650	16.7
-200m	-0.185	2.40	2100	4000	200	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	-1.789	2.60	3100	5500	300	-1.789	2.60	3100	5500	300

: 見直し範囲

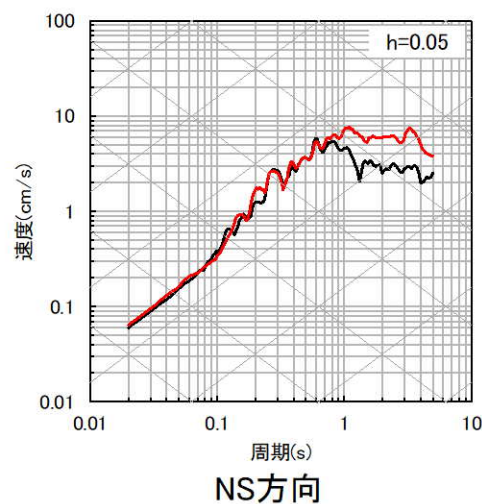
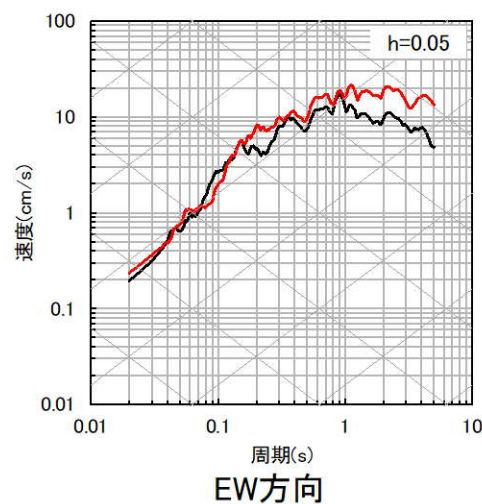
## 4. 地下構造モデルの設定

【参考】解放基盤相当（EL. -17m）の応答波と地表観測記録の応答スペクトル（E+F波）の比較

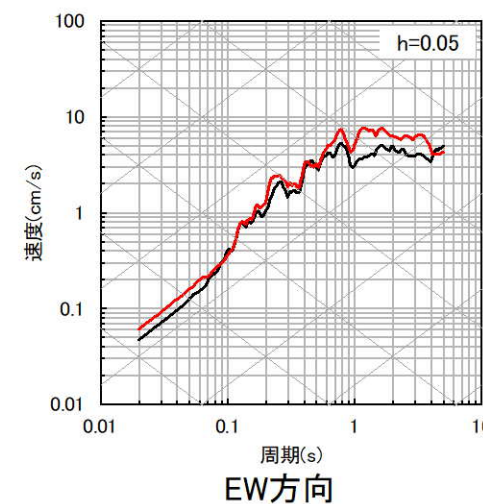
- 敷地で観測された規模の大きな地震である、2005年3月20日福岡県西方沖地震本震および2016年4月16日熊本県熊本地震本震を用いて、見直し後の標準応答スペクトル用モデルによる解放基盤相当位置（EL. -17m）での応答波と観測記録の応答スペクトルによる比較を実施。



2005年3月20日福岡県西方沖地震本震



2016年4月16日熊本県熊本地震本震

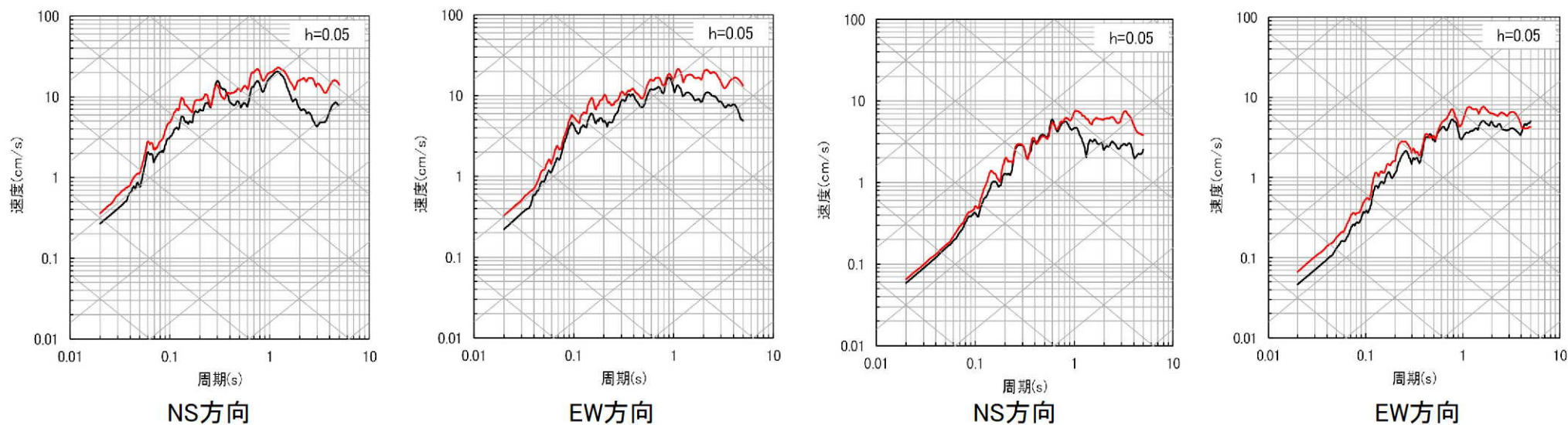




## 4. 地下構造モデルの設定

【参考】解放基盤表面 (EL. -15m) の応答波と地表観測記録 (EL. 11m) の応答スペクトル (2E波) の比較

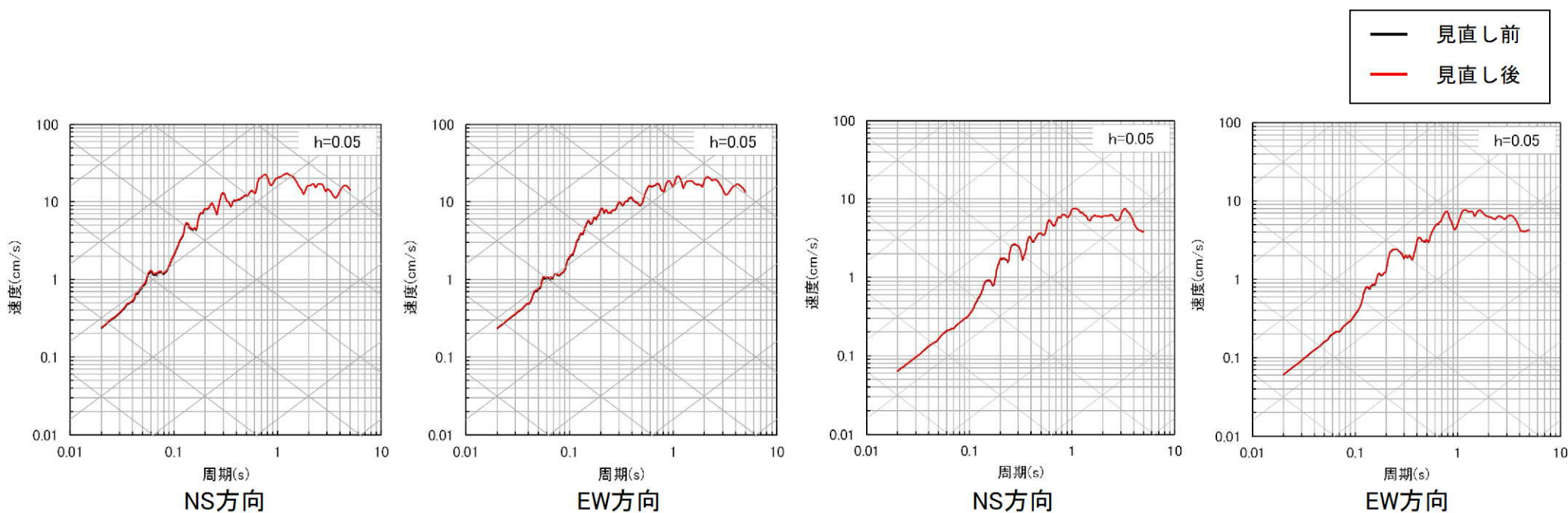
- 敷地で観測された規模の大きな地震である、2005年3月20日福岡県西方沖地震本震および2016年4月16日熊本県熊本地震本震を用いて、見直し後の標準応答スペクトル用モデルによる解放基盤位置 (EL. -15m) の応答波と地表観測記録の応答スペクトルによる比較を実施。



## 4. 地下構造モデルの設定

【参考】見直し前後の応答波の応答スペクトル（E+F波）の比較（EL. -17m）

- 敷地で観測された規模の大きな地震である、2005年3月20日福岡県西方沖地震本震および2016年4月16日熊本県熊本地震本震を用いて、見直し前後の標準応答スペクトル用モデルによる解放基盤相当位置（EL. -17m）の応答波の応答スペクトルによる比較を実施。



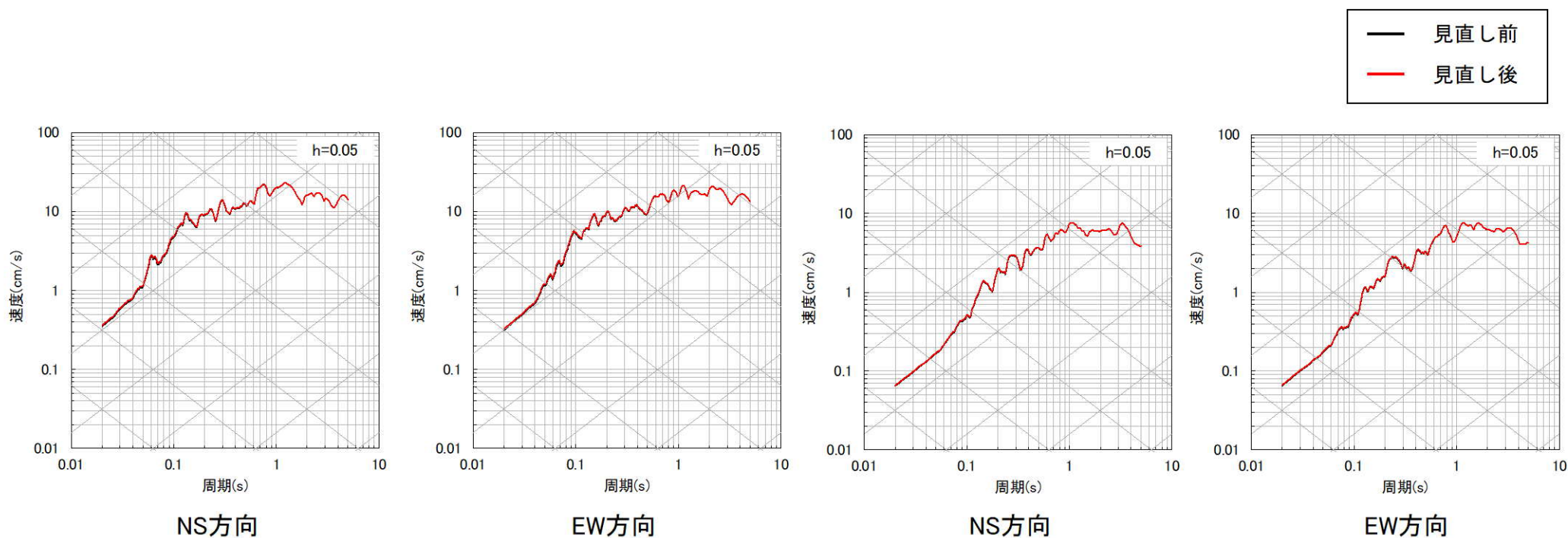
2005年3月20日福岡県西方沖地震本震

2016年4月16日熊本県熊本地震本震

## 4. 地下構造モデルの設定

### 【参考】見直し前後の応答波の応答スペクトル（2E波）の比較（EL. -15m）

- 敷地で観測された規模の大きな地震である、2005年3月20日福岡県西方沖地震本震および2016年4月16日熊本県熊本地震本震を用いて、見直し前後の標準応答スペクトル用モデルによる解放基盤位置（EL. -15m）の応答波の応答スペクトルによる比較を実施。



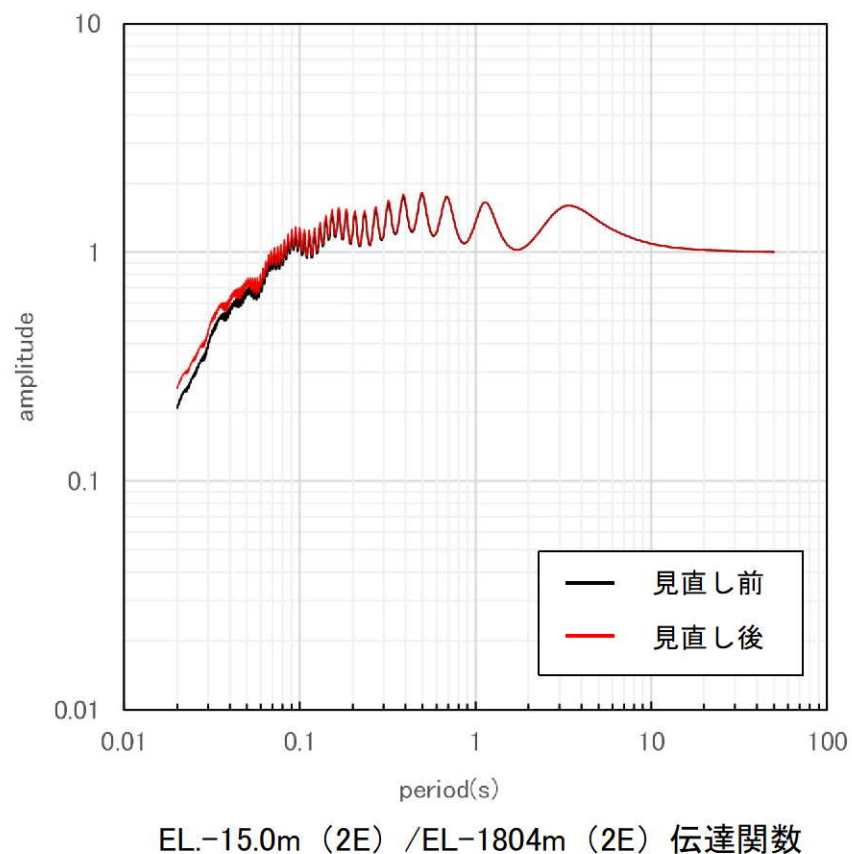
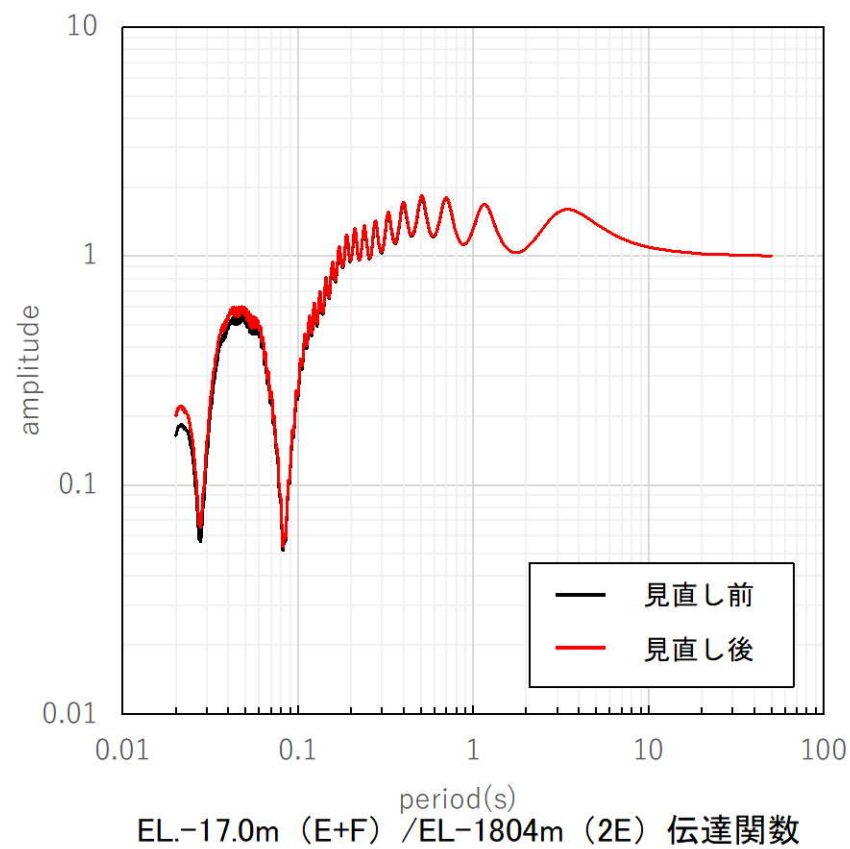
2005年3月20日福岡県西方沖地震本震

2016年4月16日熊本県熊本地震本震

## 4. 地下構造モデルの設定

### 【参考】伝達関数の比較

- 見直し前後の地下構造モデルの地震基盤相当面からの伝達関数の比較を実施。



## 5. 今後の確認内容

## 5. 今後の確認内容

### ■ 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（今後）

- 今回、地下構造モデル全体の妥当性について、規模の大きな地震（2005年福岡県西方沖地震本震、2016年熊本地震本震）を対象に作成した地震波（水平）により確認した。【31～35頁】

- 今後、(1)及び(2)の確認を実施し、次回提示。

#### (1) 震源特性に伝播経路特性を乗じた地震波

- 今回確認した規模の大きな2地震に加え、更にブロックインバージョンの検討対象地震（15地震）から残差が1.0に近い適切な地震を選定し、作成した地震基盤相当面の地震波（水平・上下）を用いて、地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと同等もしくは上回ることを確認する。

#### (2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波

- 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用いた19地震を対象に、作成した地震基盤相当面の地震波（水平・上下）を用いて、地下構造モデルによる応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルを上回ることを確認する。

## 5. 今後の確認内容

### ■ 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【47～48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19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【49～50頁参照】

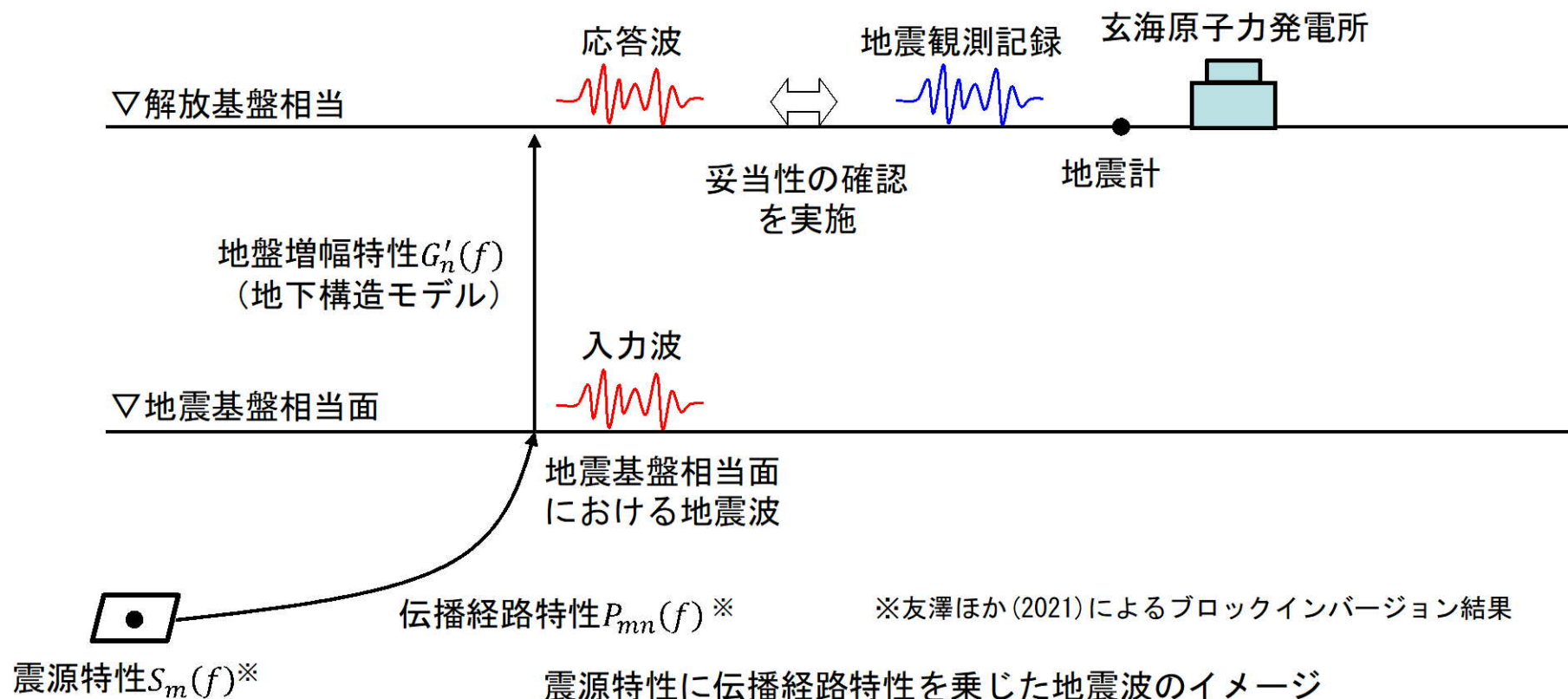
- － どの地震に対しても1つの地盤増幅特性を用いるため、観測記録があれば、どの地震でも適用できる。
- － 観測記録を地盤増幅特性を用いるため、破壊伝播効果などの残差が含まれる。
- － 19地震全てを対象とする。

## 5. 今後の確認内容

### (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。

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





## 5. 今後の確認内容

### ■ 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19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、今回は、妥当性確認に用いた規模の大きな地震である2005年福岡県西方沖地震本震及び2016年熊本地震本震については、残差が1.0に近い地震であることを確認。【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	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	180	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

## 5. 今後の確認内容

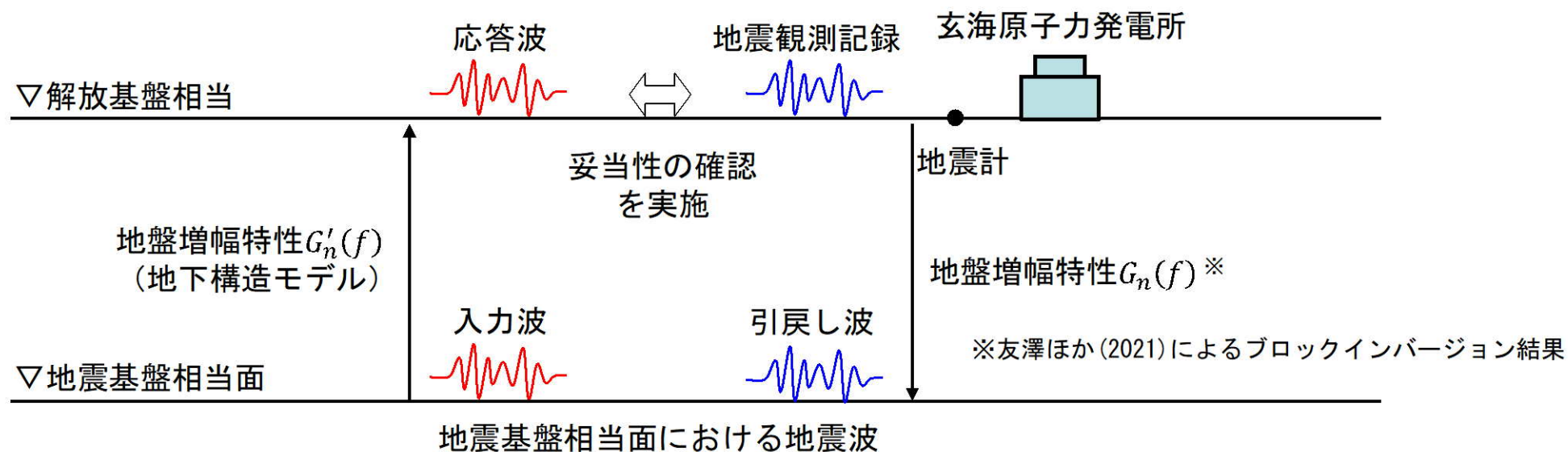
### (2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波

- 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

## 5. 今後の確認内容

### ■ 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19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）

妥当性確認に用いる地震諸元（計19地震）

番号	地震名	発生日	M	震央距離(km)	入射角(°)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	23
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	23
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	180	23
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198	23
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	22
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	22
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	22
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	23
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	23
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	23
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	23
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	23
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	23
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	23
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	23
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	23
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	23
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	23
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	23

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。

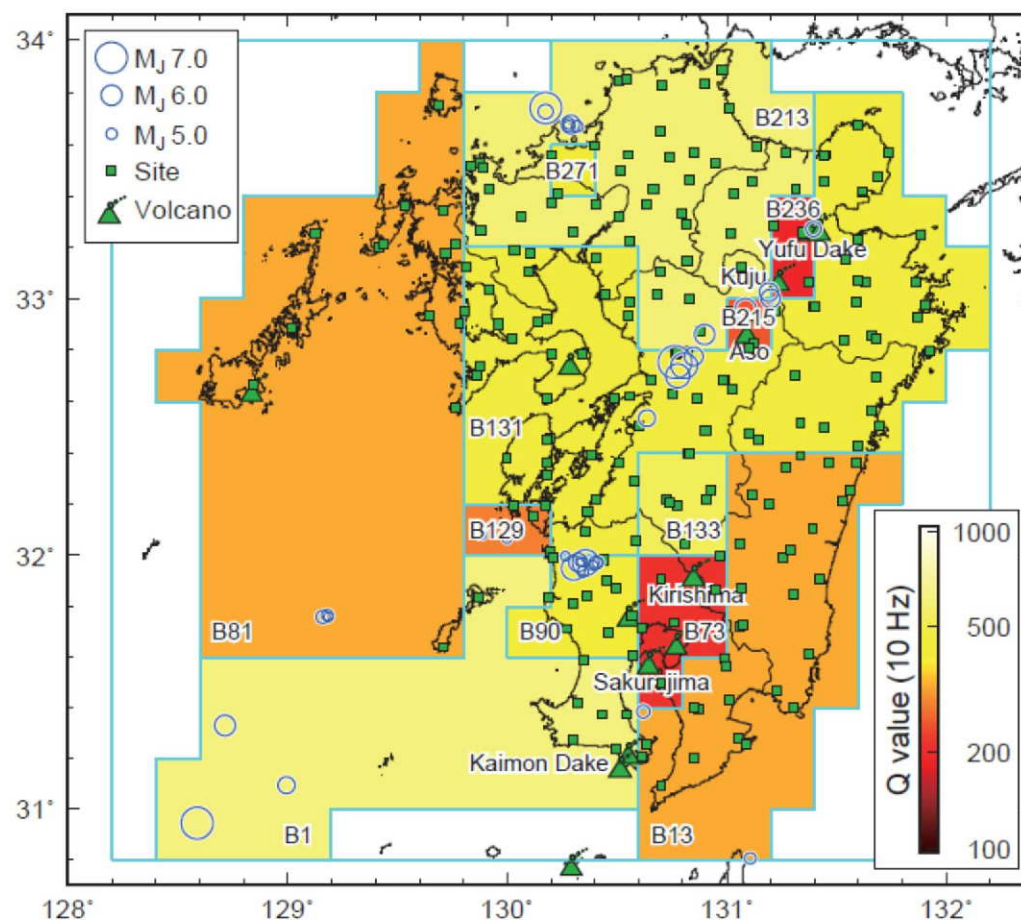


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure ※友澤ほか(2021)より抜粋

# 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)。

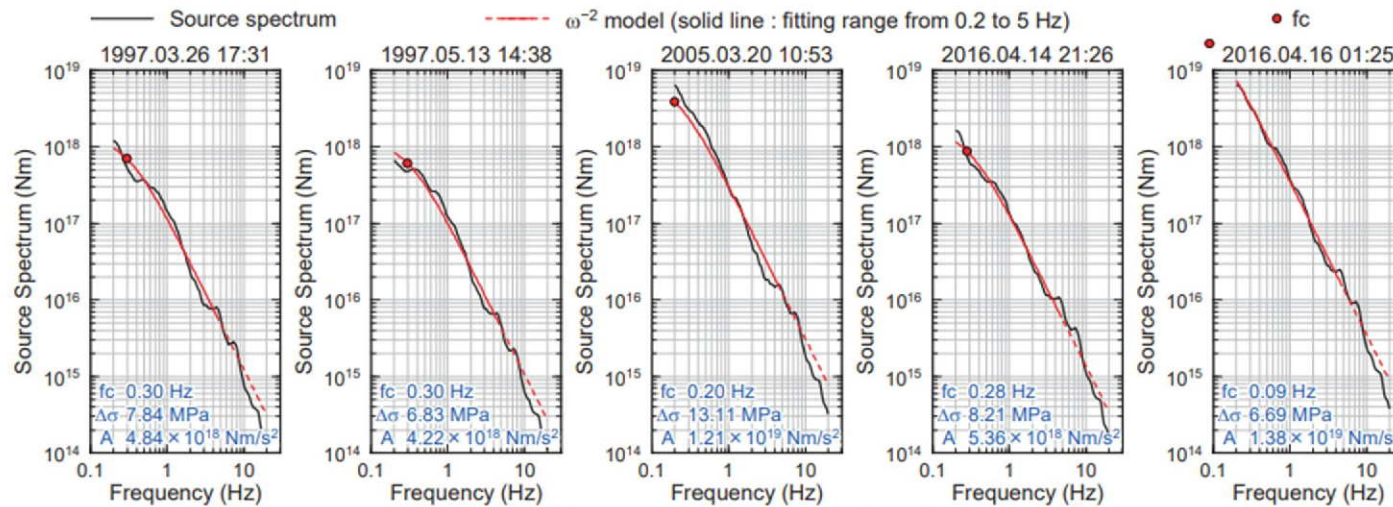


Fig.9 Source spectrum of each earthquake

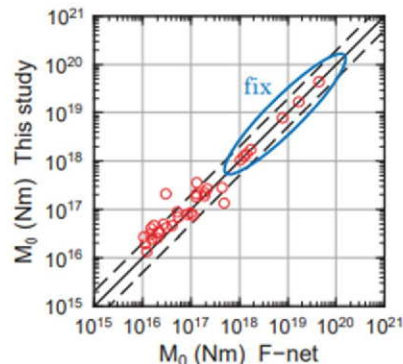


Fig.10 Comparison of  $M_0$  of F-net to that of this study

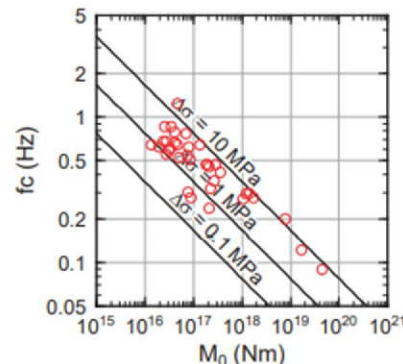


Fig.11 Scaling relation between  $M_0$  and  $f_c$

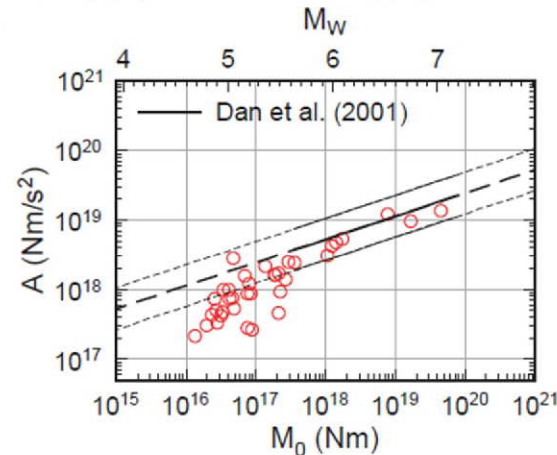


Fig.12 Scaling relation between  $M_0$  and  $A$

※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。

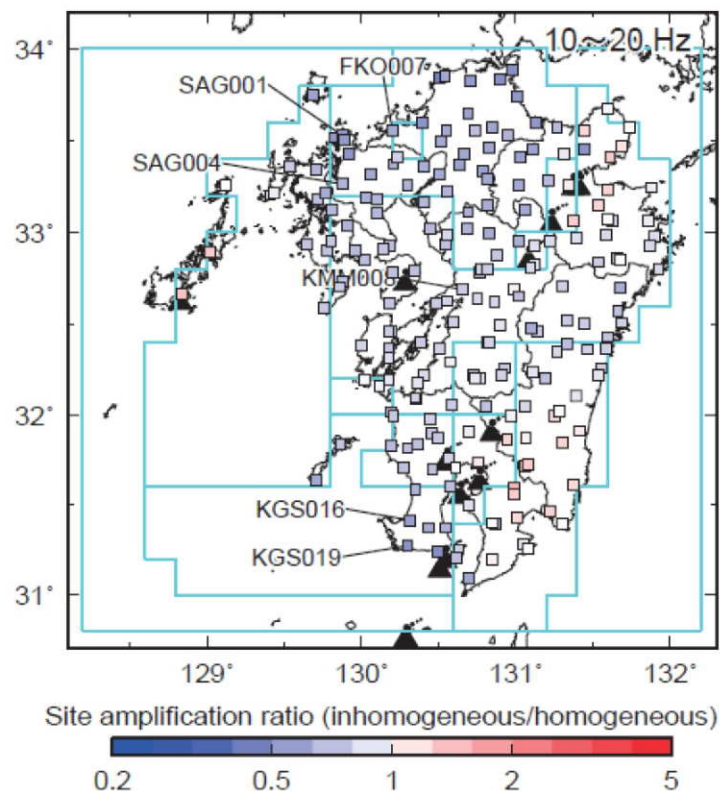


Fig.13 Spatial distribution of site amplification ratio

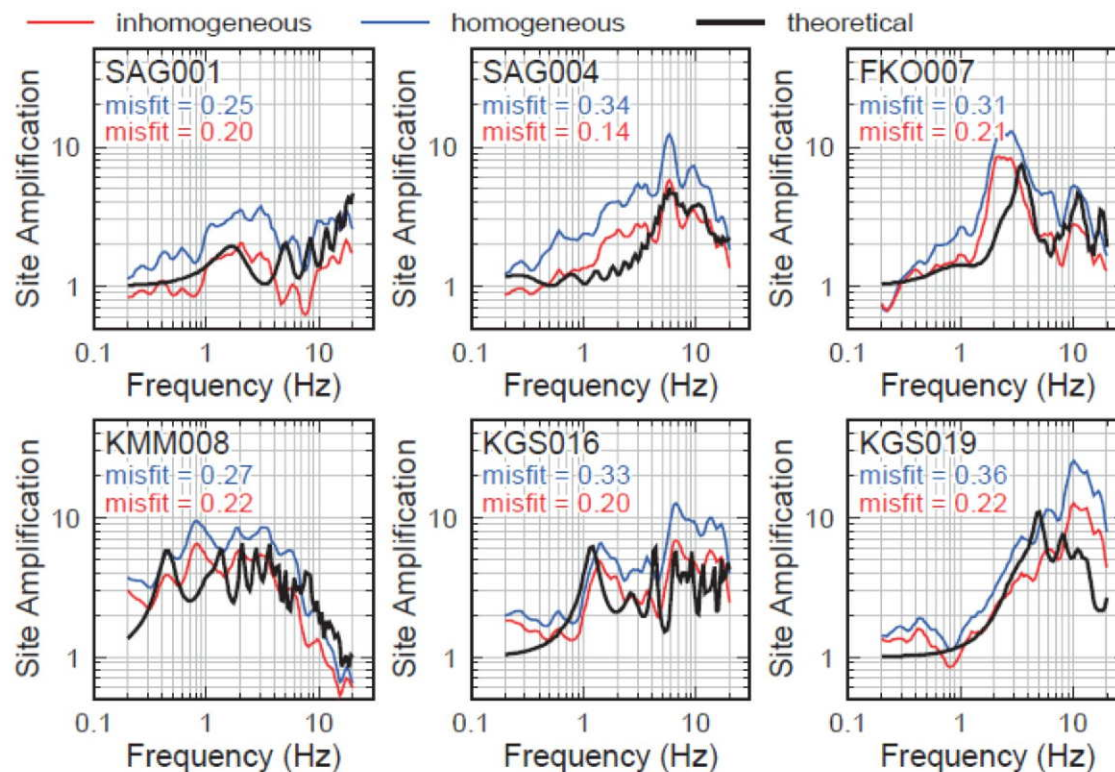


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

## 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。

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

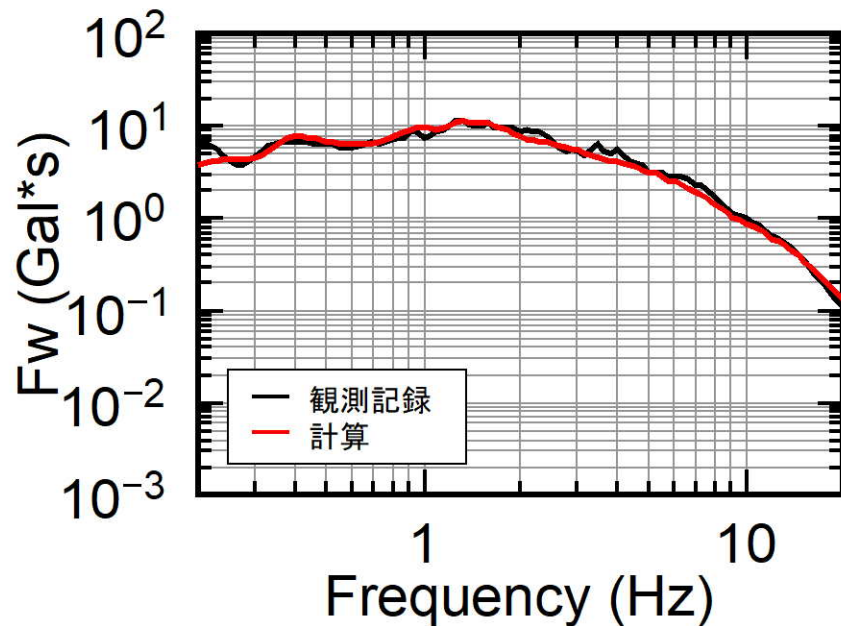
- 地震ごと、観測点ごとに残差 $E_{mn}(f)$ は異なるため、ブロックインバージョン結果を用いた地下構造モデル全体の妥当性確認における地震基盤相当面の地震波の作成では、この残差 $E_{mn}(f)$ の取扱いに留意する必要あり。
- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ は、下記の要因等が考えられる。
  - 震源の破壊伝播効果、放射特性
  - 表面波などのS波部分以外の波形
  - 各特性の推定誤差 など
- 残差 $E_{mn}(f)$ が1.0に近いほど、観測記録 $O_{mn}(f)$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

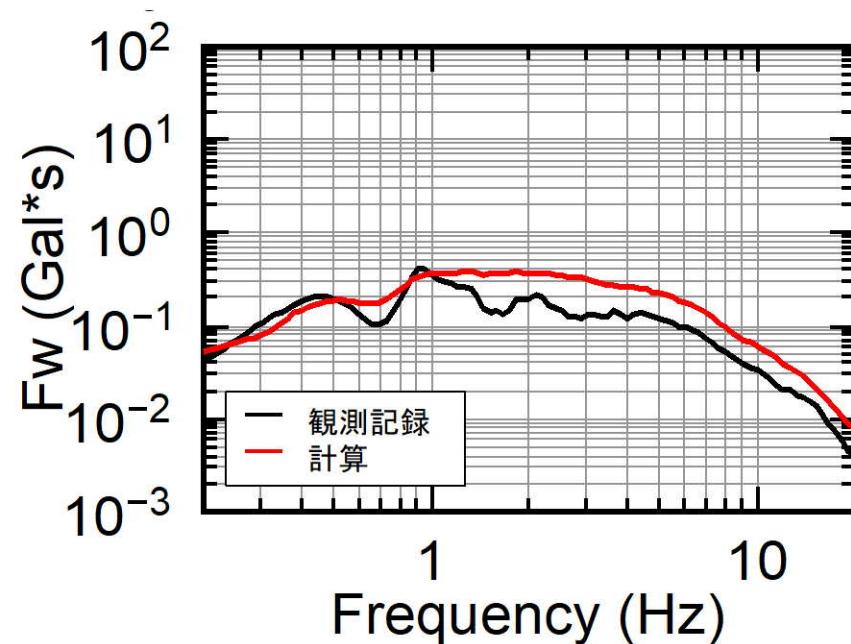
### ■ 地震ごとの残差について

- 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（2016年熊本地震本震）



残差が1.0から乖離した地震の例

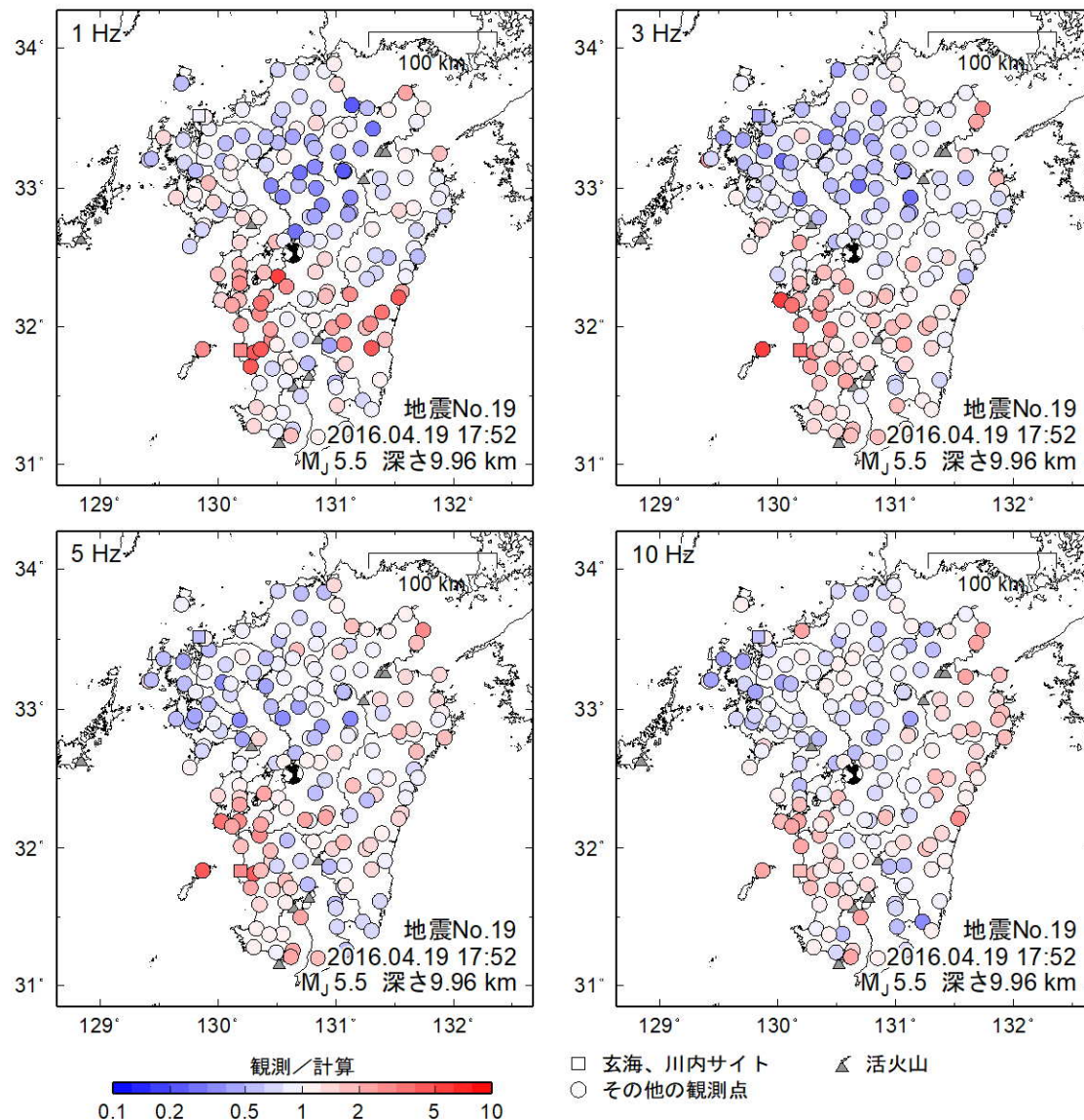
⑲熊本県熊本地方の地震

玄海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

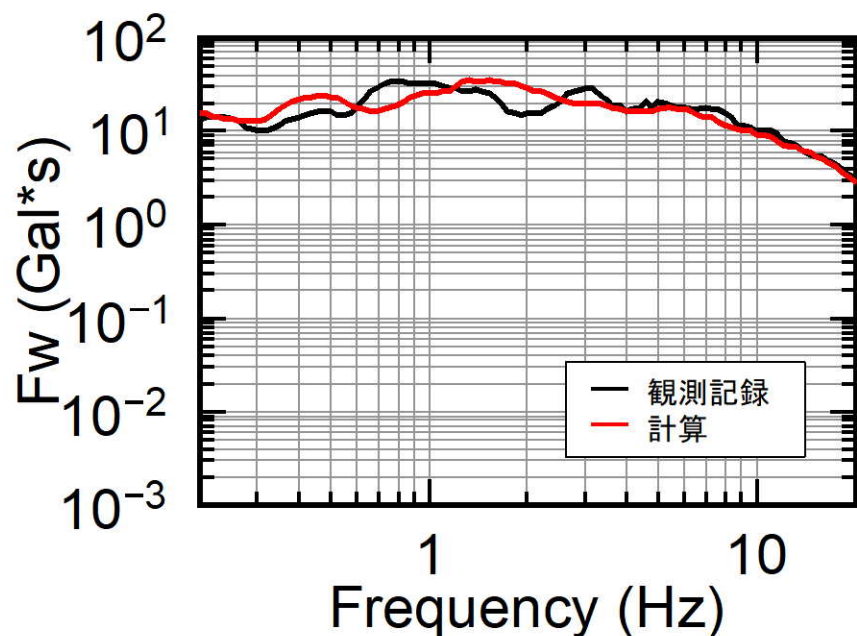
残差の空間分布の例

参考資料③ 今回対象とした規模の大きな地震の残差

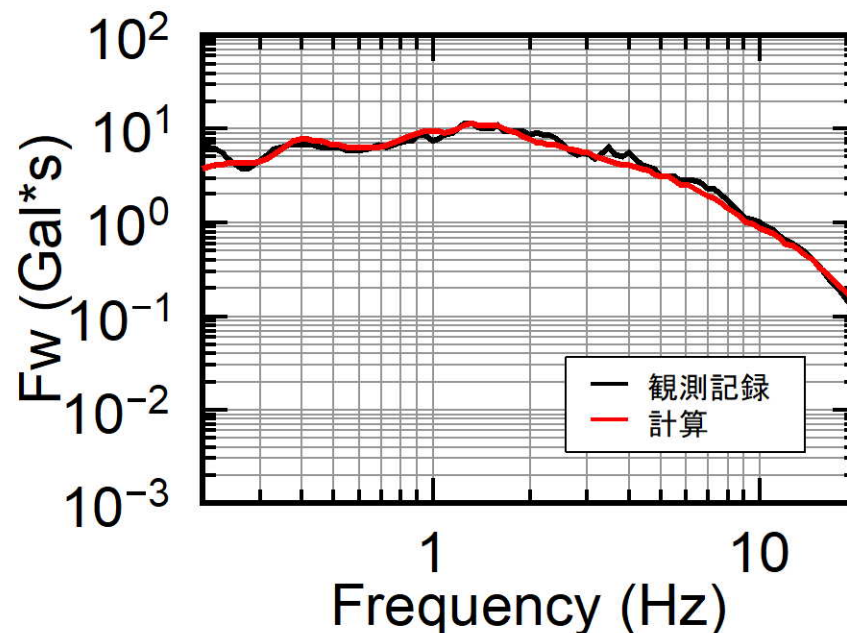
## 参考資料③ 今回対象とした規模の大きな地震の残差

### ■ 地下構造モデル全体の妥当性確認を実施した2地震の残差

- ・ 今回の地下構造モデル全体の妥当性確認では、敷地で観測された規模の大きな地震である2005年3月20日福岡県西方沖地震本震、及び2016年4月16日熊本県熊本地震本震を対象に実施した。
- ・ これらの地震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 $F_{mn}(f)$ に大きな差異は見られず、残差 $E_{mn}(f)$ は1.0に近い結果となっている。



2005年3月20日福岡県西方沖地震本震

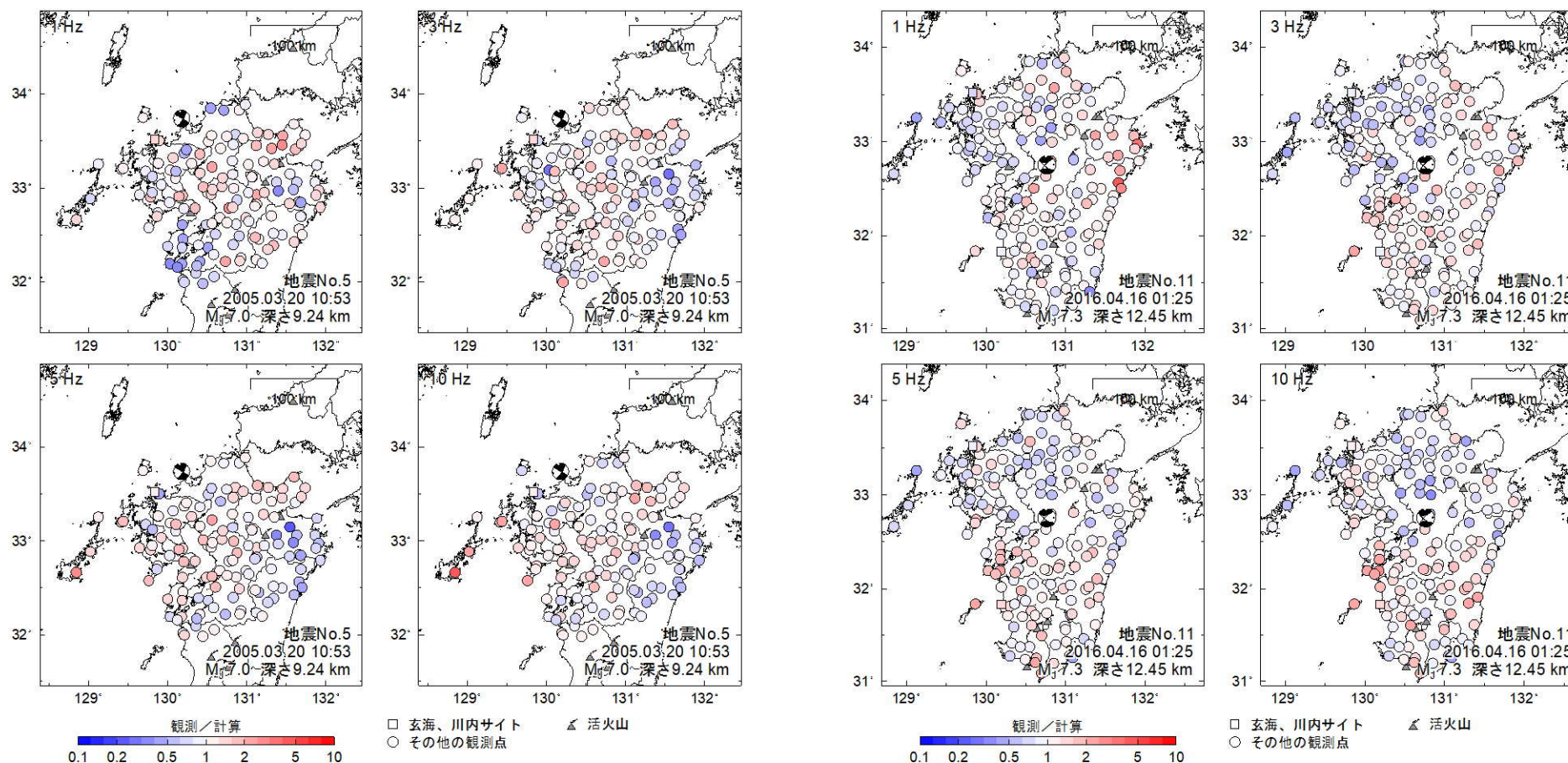


2016年4月16日熊本県熊本地震本震

# 参考資料③ 今回対象とした規模の大きな地震の残差

## ■ 地下構造モデル全体の妥当性確認を実施した2地震の残差の空間分布

- 今回、地下構造モデル全体の妥当性確認を実施した2地震の残差の空間分布では、玄海原子力発電所周辺における特異な残差の偏りは見られないため、破壊伝播効果等の影響は少ないと考えられる。
- 以上から、今回、地下構造モデル全体の妥当性確認を実施した2地震は適切であることを確認。



2005年3月20日福岡県西方沖地震本震

2016年4月16日熊本県熊本地震本震

## 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.