

川内原子力発電所1号炉、2号炉審査資料	
資料番号	TTS-020
提出年月日	2023年2月1日

# 川内原子力発電所 1号炉及び2号炉

## 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における 地下構造モデルの設定について 〔参考資料（検討状況）〕

2023年2月1日  
九州電力株式会社

# 目次

1. 友澤ほか（2021）を用いた検討状況 .....	P. 2
2. 検討状況を踏まえた考察 .....	P. 8
3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認 .....	P. 18
【参考】玄海サイトにおける代表2地震の選定の妥当性 .....	P. 26

## 1. 友澤ほか（2021）を用いた検討状況

# 1. 友澤ほか（2021）を用いた検討状況

## ■ 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検討に用いる地震

- 伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰（Q値）の検討等に用いている20地震のうち、友澤ほか（2021）の検討対象の15地震について検討を実施。
- 友澤ほか（2021）における、観測記録の選定条件は以下の通り。
  - 震源深さ20km以浅の内陸地殻内地震
  - Mj4.8以上の地震  
(ただし、対象地震の地域の偏りを避けるため2016年熊本地震の震源域はMj5.5以上)
  - K-NET地表観測記録、KiK-net地中観測記録、川内原子力発電所地表観測記録、玄海原子力発電所地表観測記録を対象
  - 地表の最大加速度が三成分とも200cm/s<sup>2</sup>以下（地盤の非線形化の影響を避けるため）
  - 等価震源距離200km以内

友澤ほか（2021）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

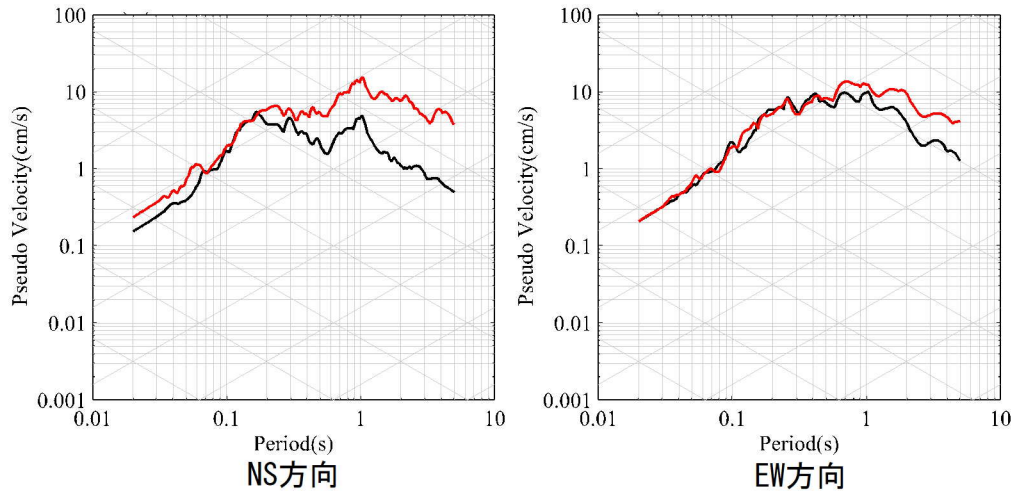


# 1. 友澤ほか (2021) を用いた検討状況

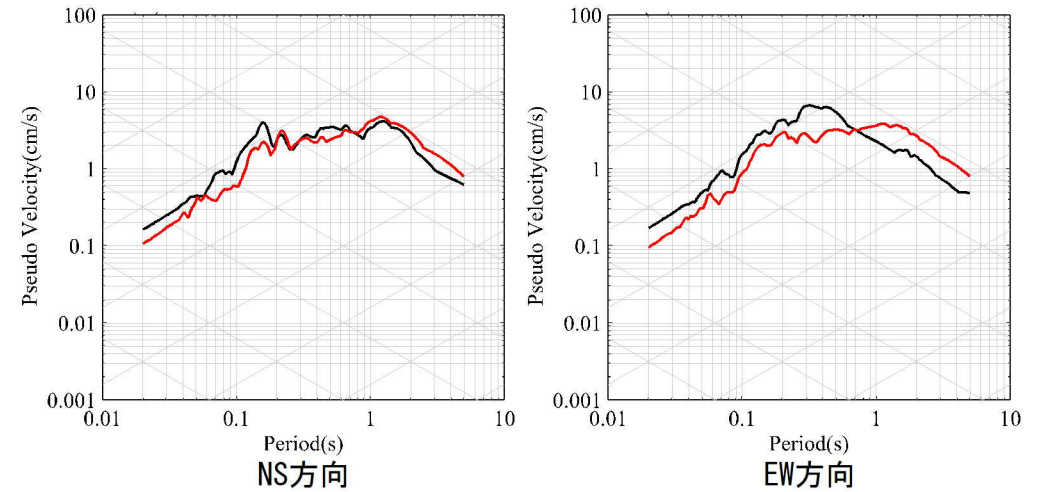
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (1/4)



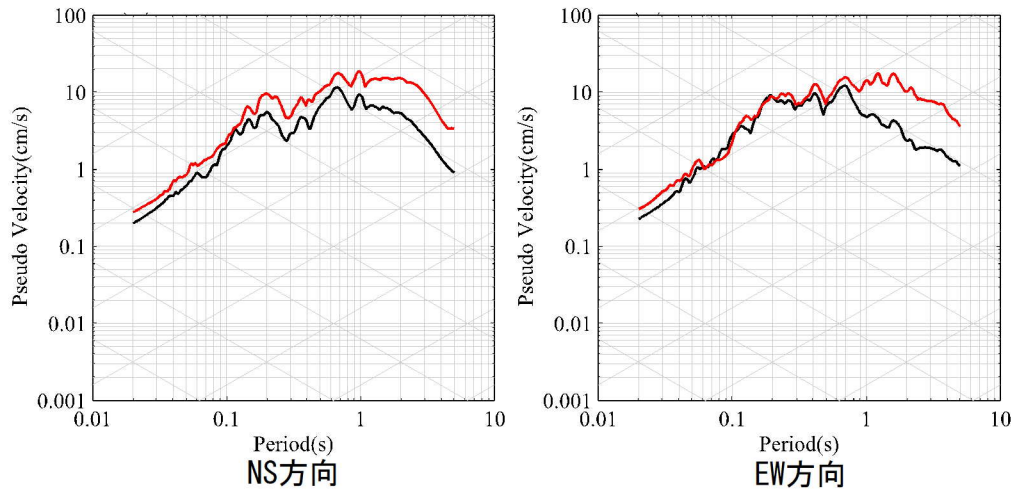
③ 鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



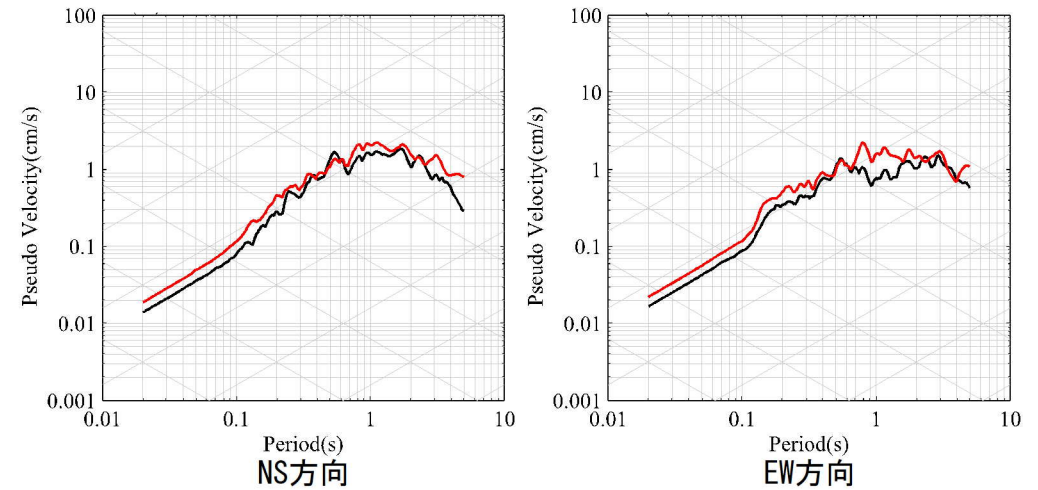
④ 鹿児島県北西部



⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



⑥ 薩摩半島西方沖

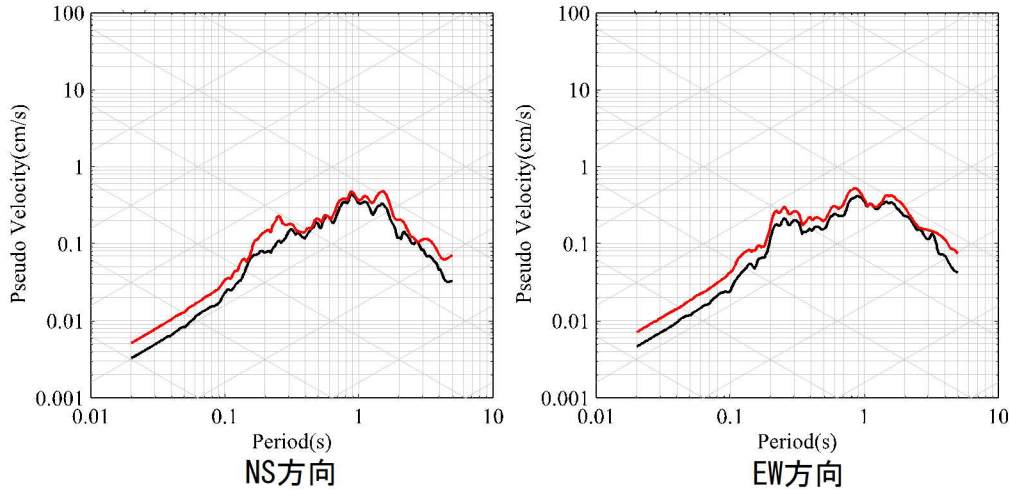


# 1. 友澤ほか (2021) を用いた検討状況

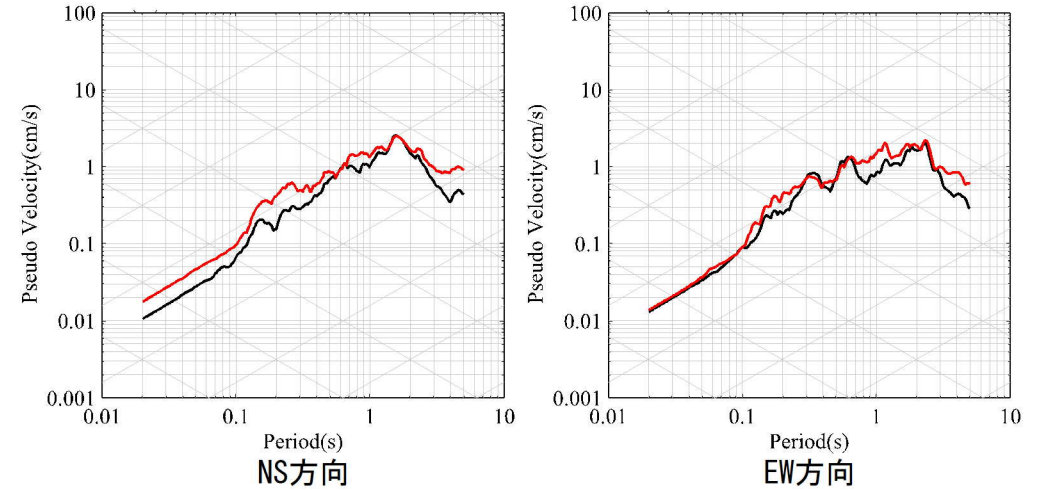
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (2/4)



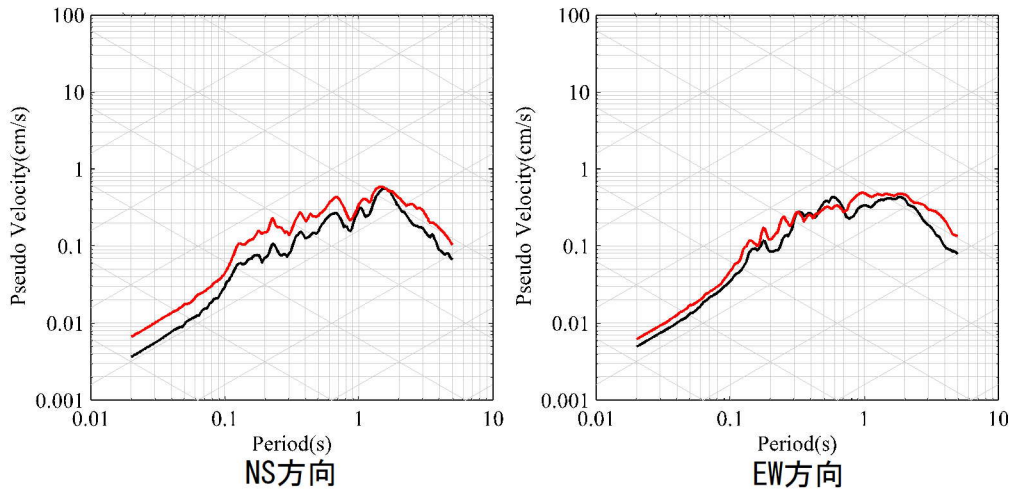
⑦薩摩半島西方沖



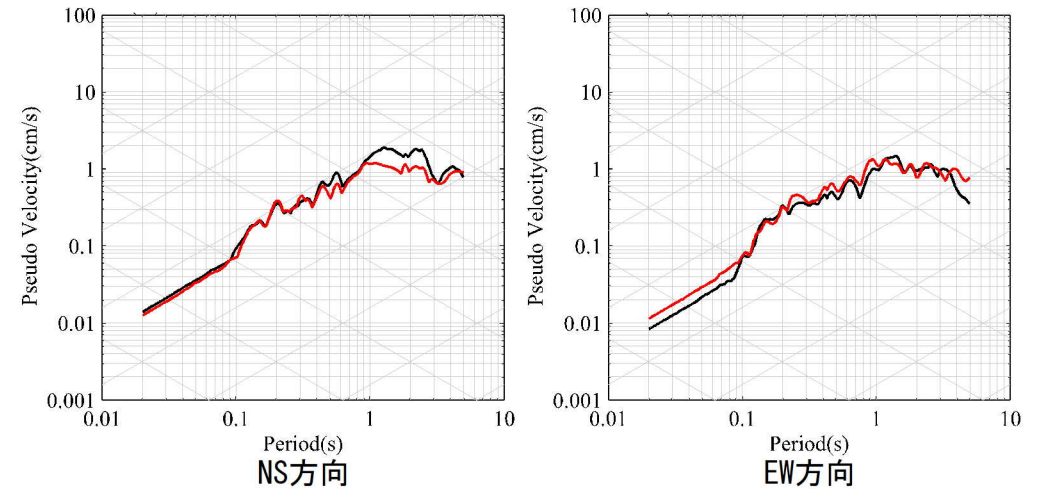
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



⑨熊本県熊本地方



⑩熊本県熊本地方

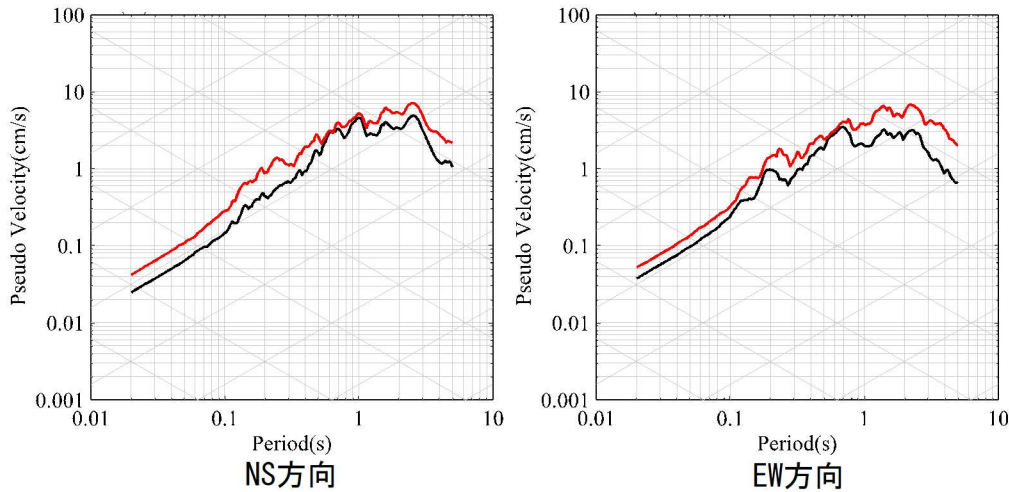


# 1. 友澤ほか (2021) を用いた検討状況

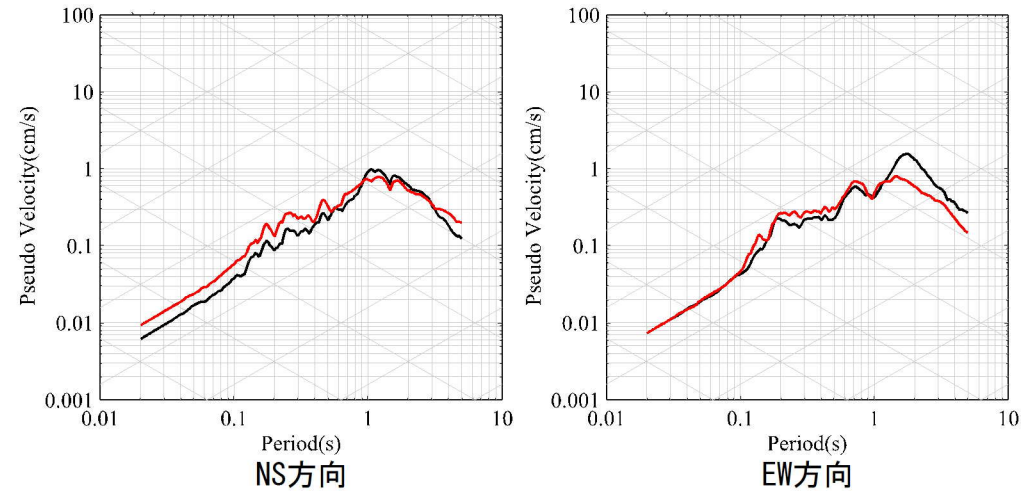
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (3/4)



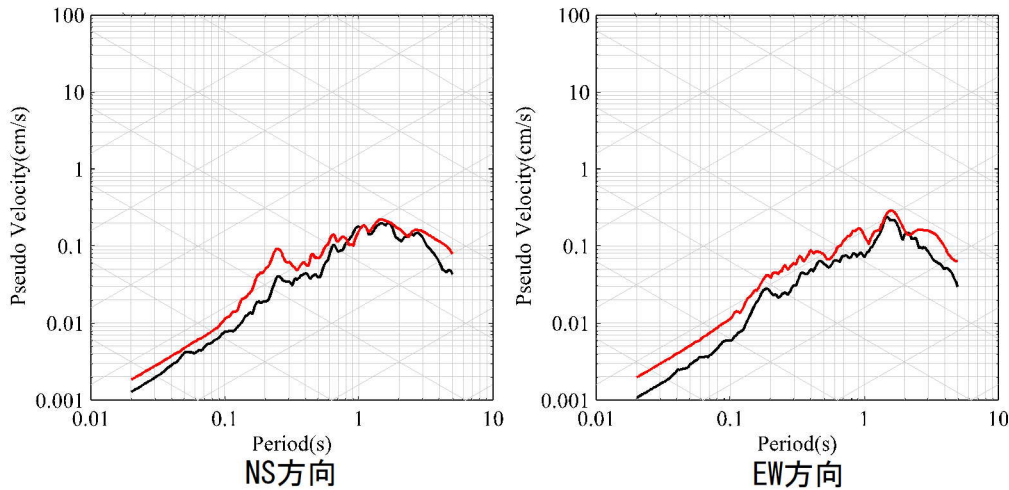
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



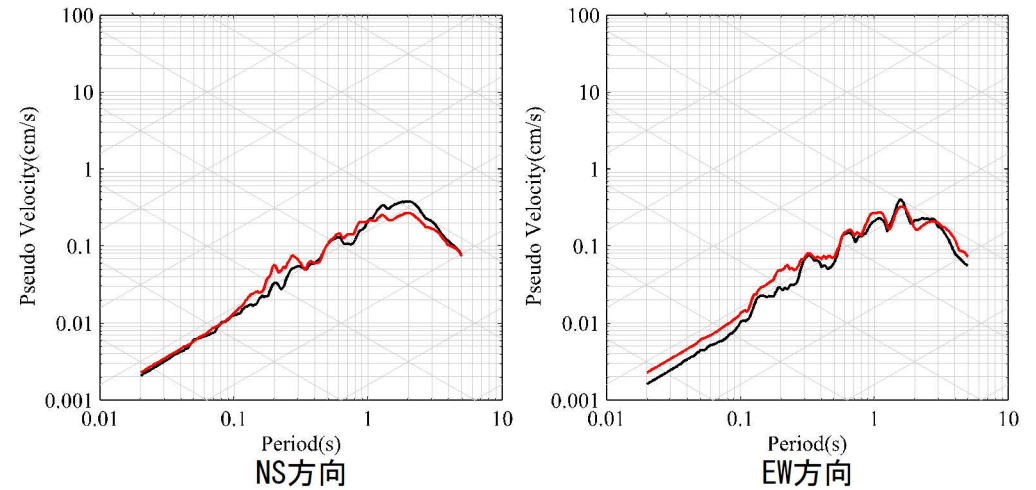
⑬ 熊本県熊本地方



⑭ 熊本県阿蘇地方



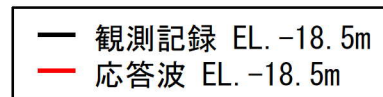
⑮ 熊本県阿蘇地方



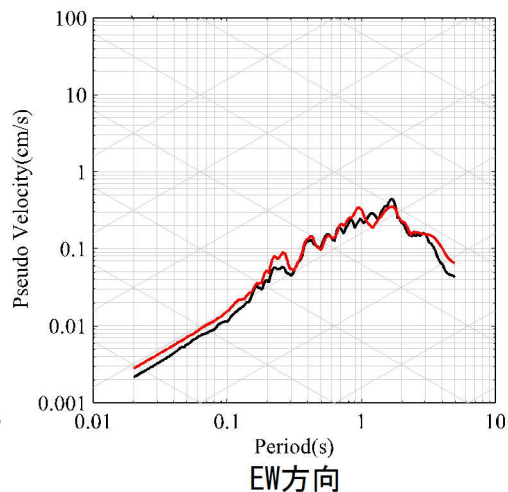
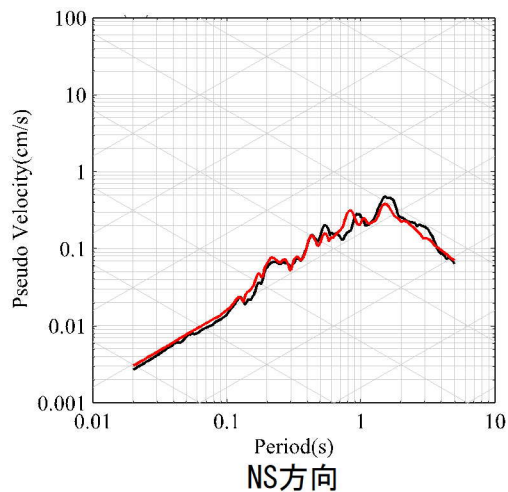


# 1. 友澤ほか (2021) を用いた検討状況

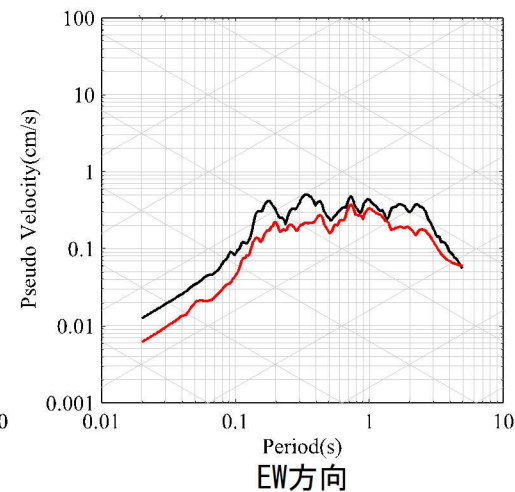
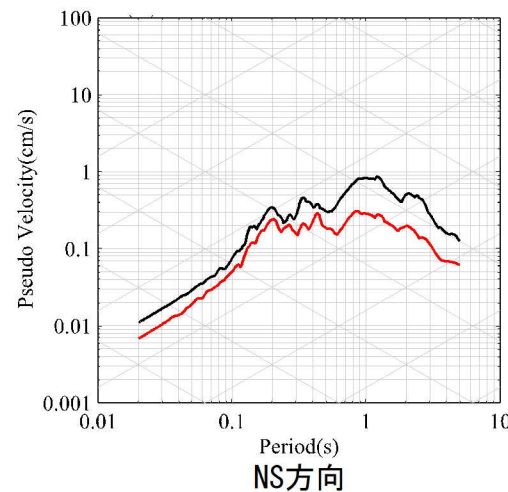
## ■ 応答スペクトルの比較結果 (4/4)



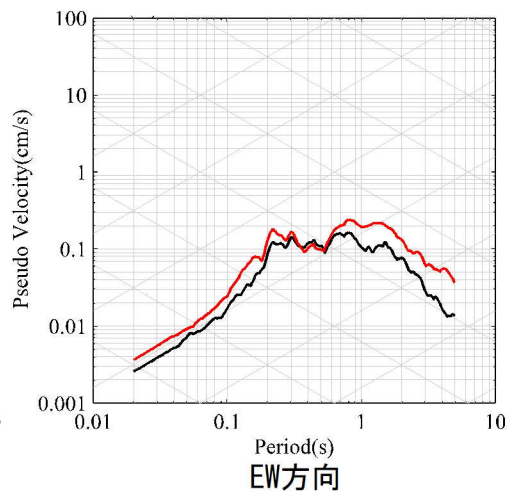
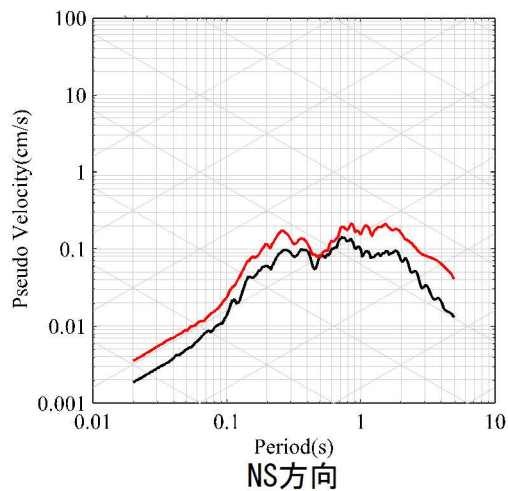
⑱ 熊本県阿蘇地方



⑲ 熊本県熊本地方



⑳ 薩摩半島西方沖

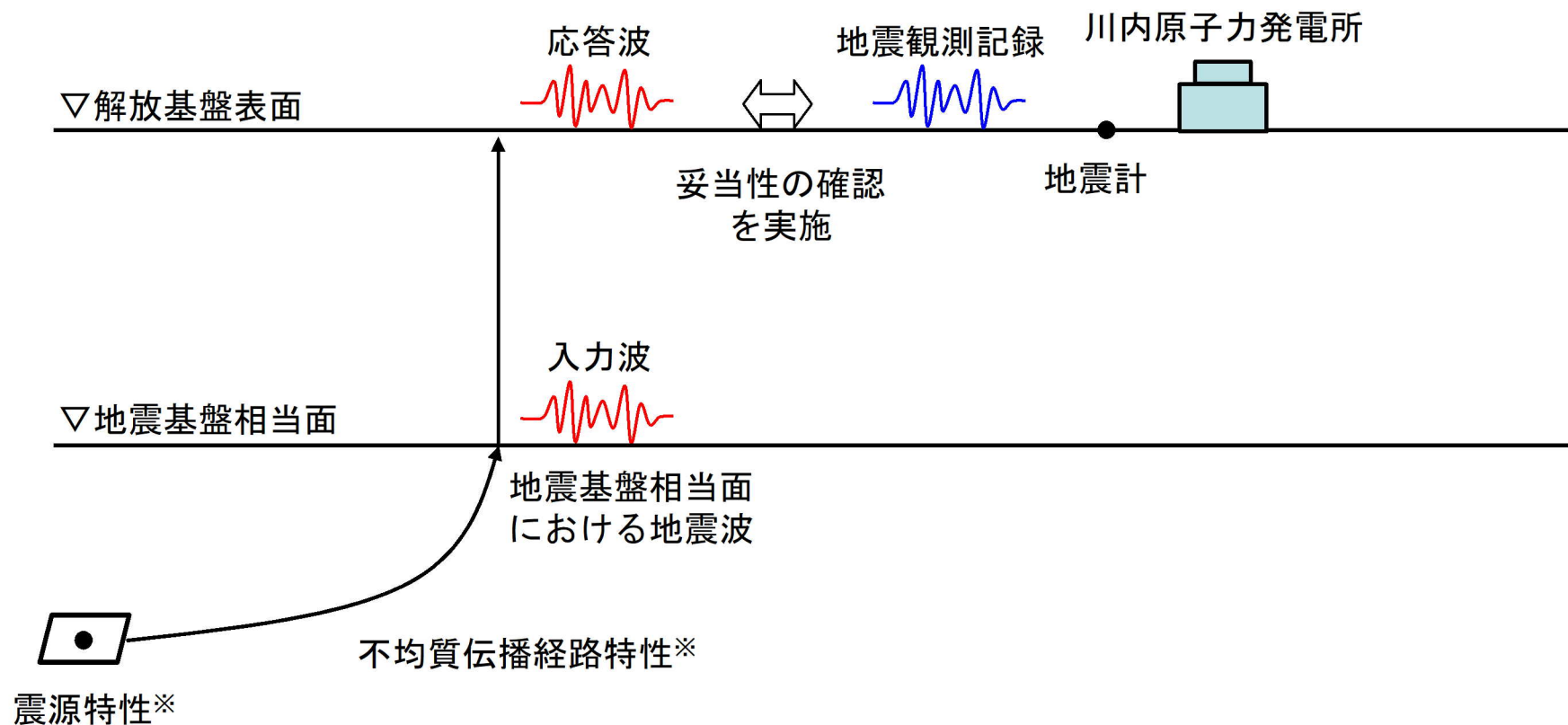


## 2. 検討状況を踏まえた考察

- ◆ ブロックインバージョンにおいて、震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性の各特性が分離できていることの説明
- ◆ 「1. 友澤ほか(2021)を用いた検討状況」において、一部の地震で応答波が観測記録を下回っていることを踏まえ、その原因についての考察を実施

## 2. 検討状況を踏まえた考察

- 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下構造モデル全体の妥当性確認
  - 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各地震の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。



※友澤ほか（2021）によるブロックインバージョン結果

地下構造モデルの妥当性確認のイメージ



## 2. 検討状況を踏まえた考察

### ■ 友澤ほか（2021）<sup>1)</sup>におけるブロックインバージョン解析

- 観測記録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される。

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

※ $m$ 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解析結果の3つの特性が適切に分離されていることが確認されている。（11～13頁参照）
- 友澤ほか（2021）におけるブロックインバージョン解析は、一般的なスペクトルインバージョン解析と異なり、以下の相違点を考慮して、精度の高い解析を実施。
  - 伝播経路特性の $Q$ 値は、領域を分割・統合し、不均質な減衰構造を仮定。
  - 2つの基準観測点の理論増幅率で拘束。

## 2. 検討状況を踏まえた考察

### (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。

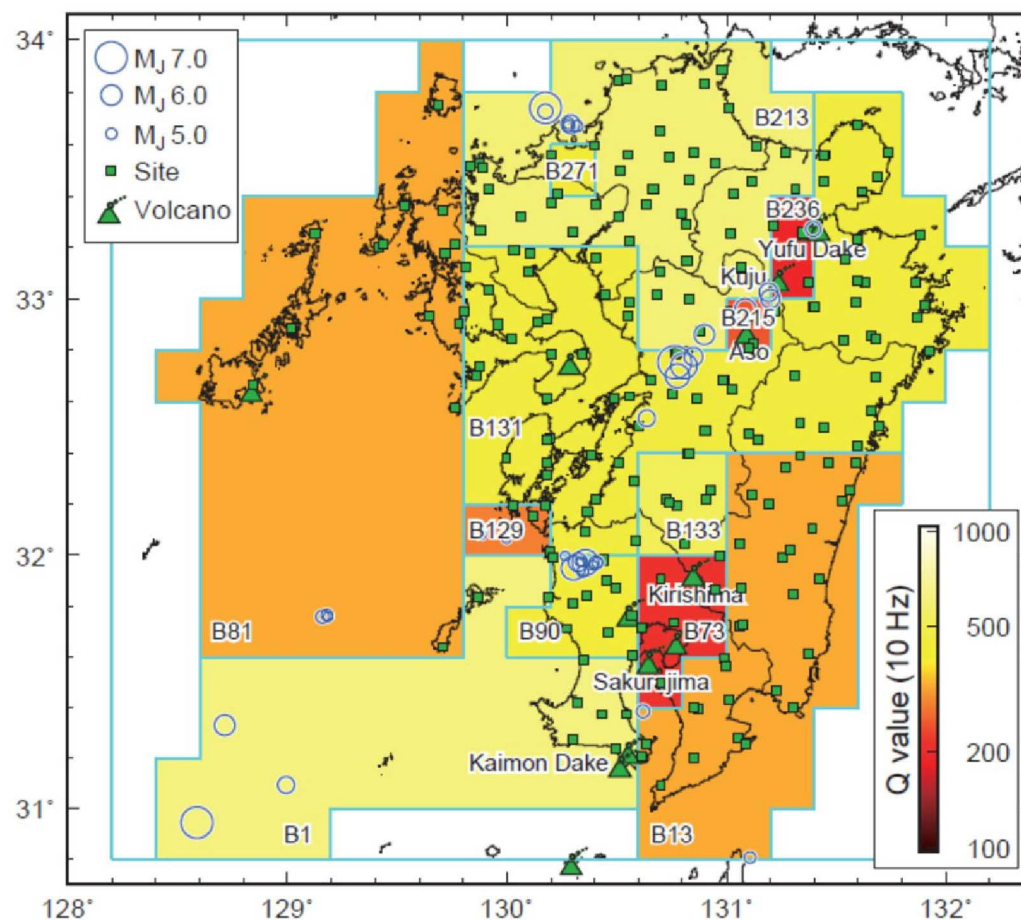


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure ※友澤ほか (2021) より抜粋

## 2. 検討状況を踏まえた考察

### (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)。

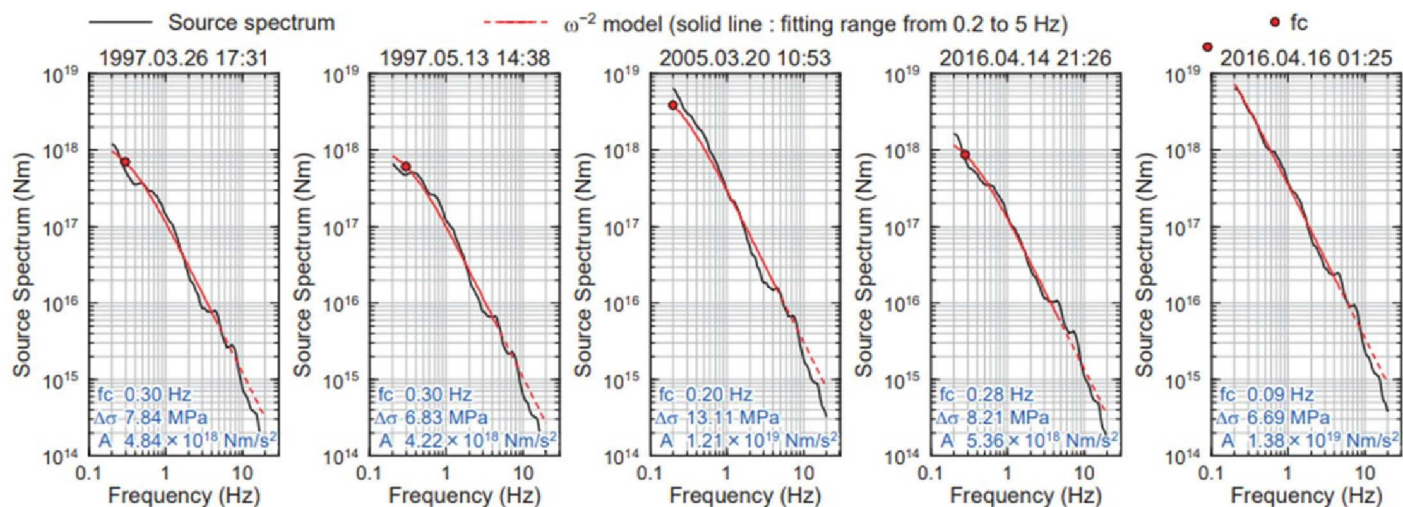


Fig.9 Source spectrum of each earthquake

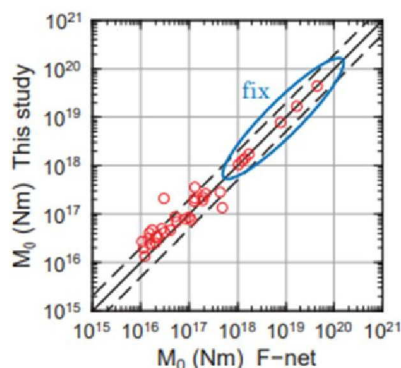


Fig.10 Comparison of  $M_0$  of F-net to that of this study

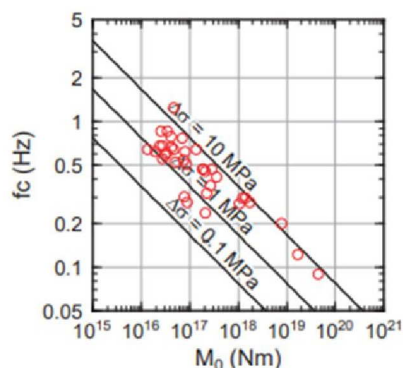


Fig.11 Scaling relation between  $M_0$  and  $f_c$

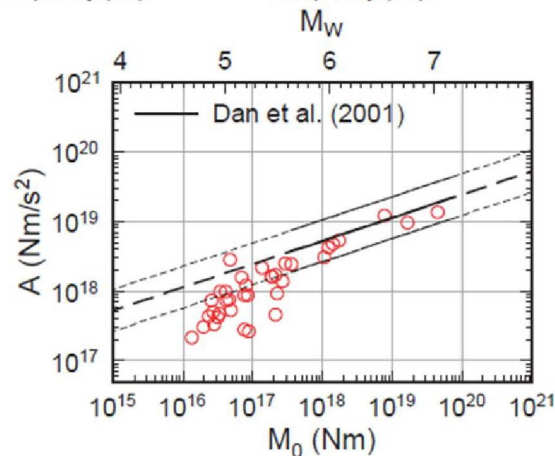


Fig.12 Scaling relation between  $M_0$  and  $A$

※友澤ほか (2021) より抜粋



## 2. 検討状況を踏まえた考察

### (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。

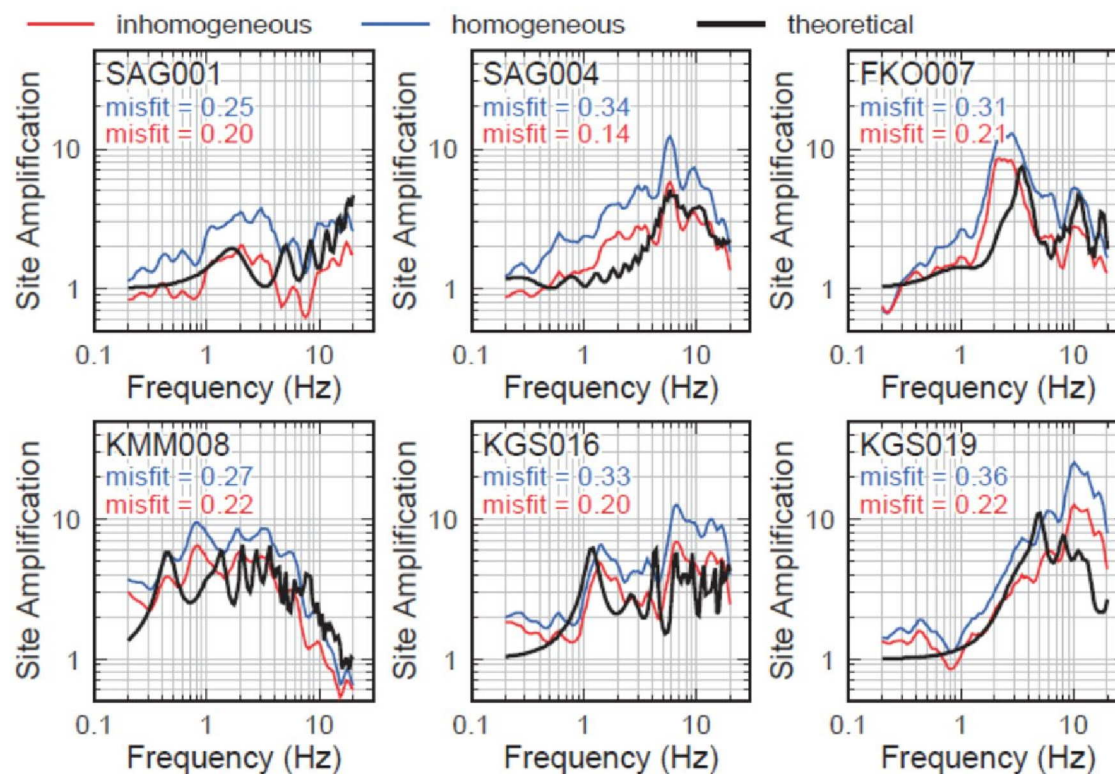
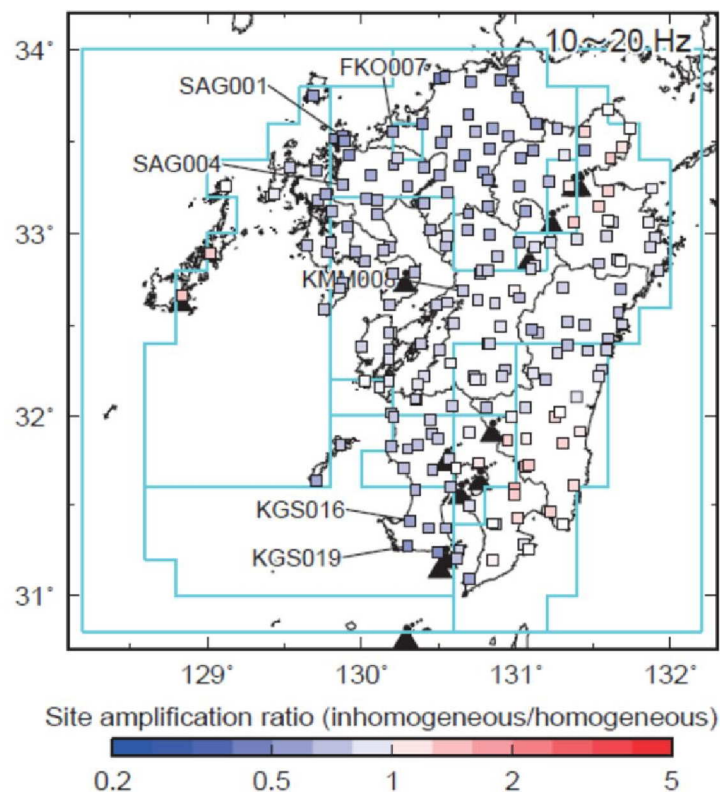


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

## 2. 検討状況を踏まえた考察

### ■ ブロックインバージョン解析における残差

- 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、観測記録ごとに異なる。

$$E_{mn}(f) = O_{mn}(f) / F_{mn}(f)$$

※ $m$ は地震に対する添え字、 $n$ は観測点に関する添え字

- ブロックインバージョン解析において、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、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決定される。
- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ は、計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ に残差 $E_{mn}(f)$ を乗じた式で表現され、残差 $E_{mn}(f)$ が1.0に近いほど、観測記録と計算が一致する。

$$O_{mn}(f) = F_{mn}(f)E_{mn}(f)$$

※ $m$ は地震に対する添え字、 $n$ は観測点に関する添え字

## 2. 検討状況を踏まえた考察

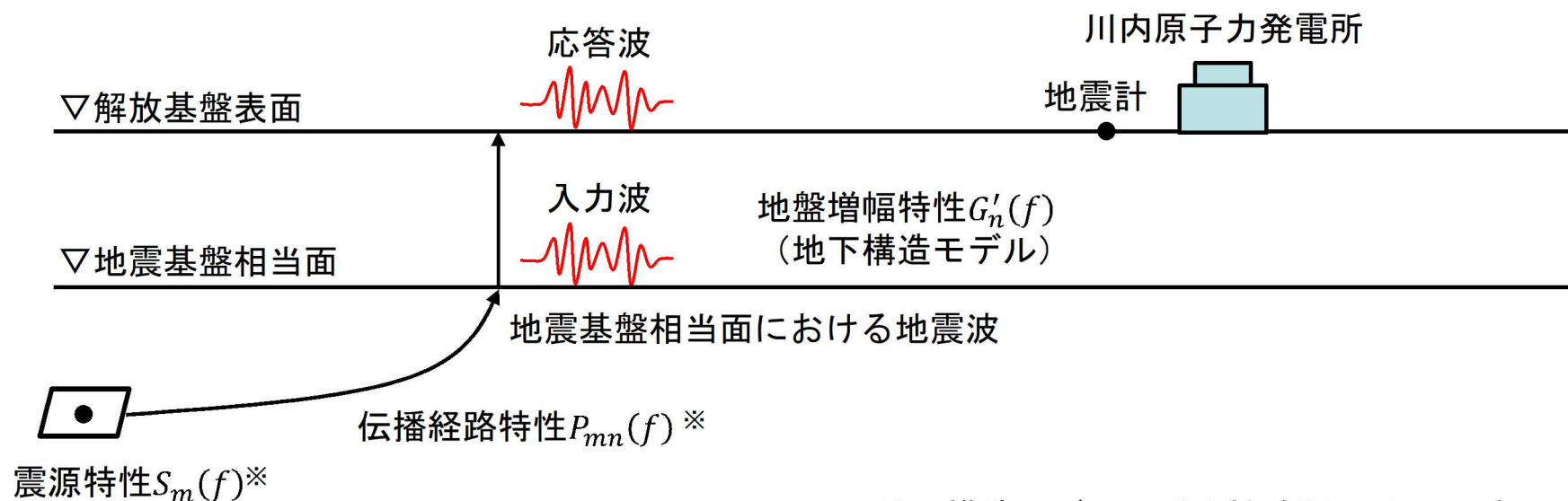
### ■ 友澤ほか (2021) によるブロックインバージョン結果を用いた応答波

- 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各地震の震源特性 $S_m(f)$ に伝播経路特性 $P_{mn}(f)$ 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一次元波動論により応答波を算出。地下構造モデルによる地盤増幅特性を $G'_n(f)$ とする。
- 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。

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

※ $m$ は地震に対する添え字、 $n$ は観測点に関する添え字

- 今回の地下構造モデルの妥当性確認において、観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と算出した応答波のフーリエ振幅スペクトル $C_{mn}(f)$ の比較を実施するが、地下構造モデルの地盤増幅特性 $G'_n(f)$ に依存しない残差 $E_{mn}(f)$ の影響が小さい観測記録を選定する必要がある。



※友澤ほか (2021) によるブロックインバージョン結果

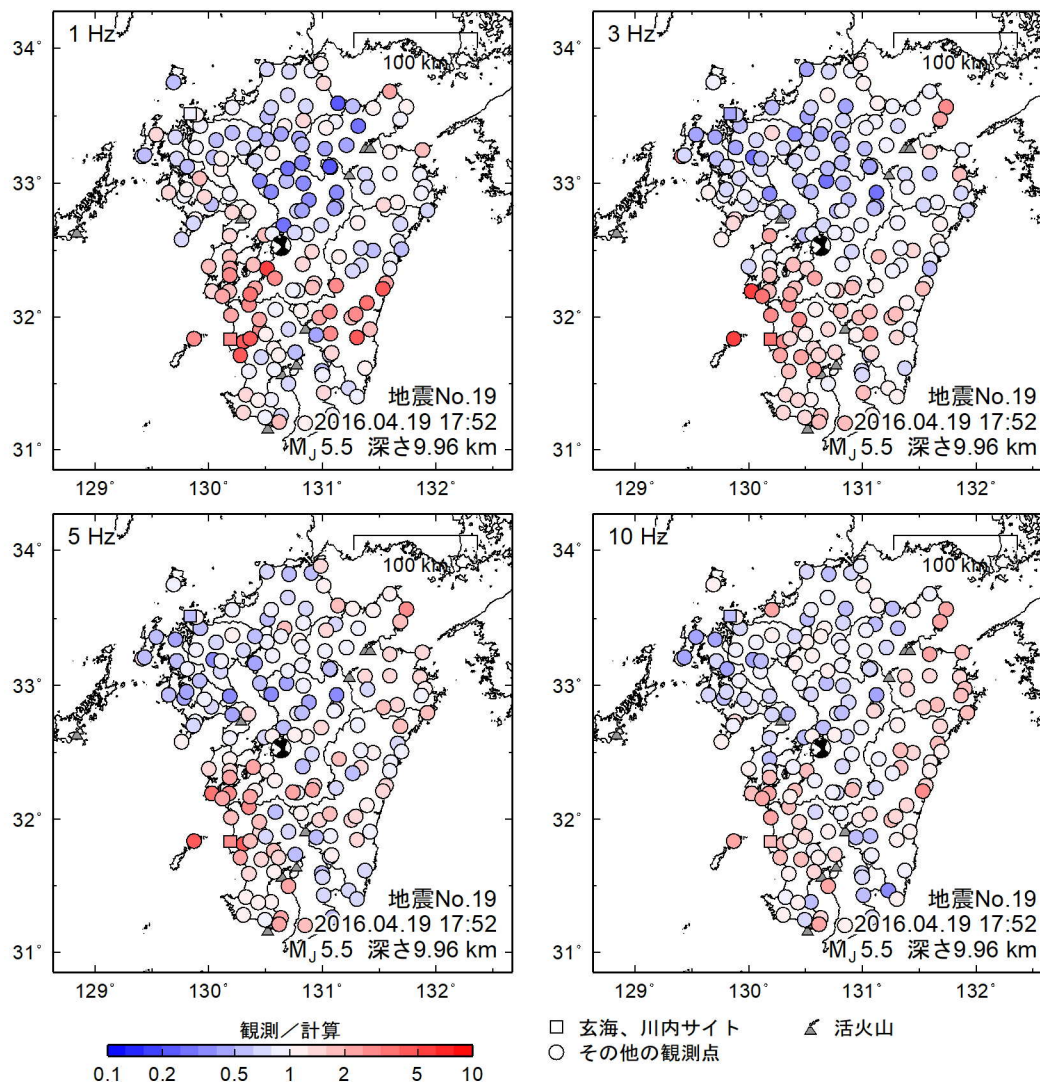
地下構造モデルの妥当性確認のイメージ



## 2. 検討状況を踏まえた考察

### ■ 観測記録とブロックインバージョン結果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 など
- 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。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。(例：  
⑱熊本県熊本地方の地震)



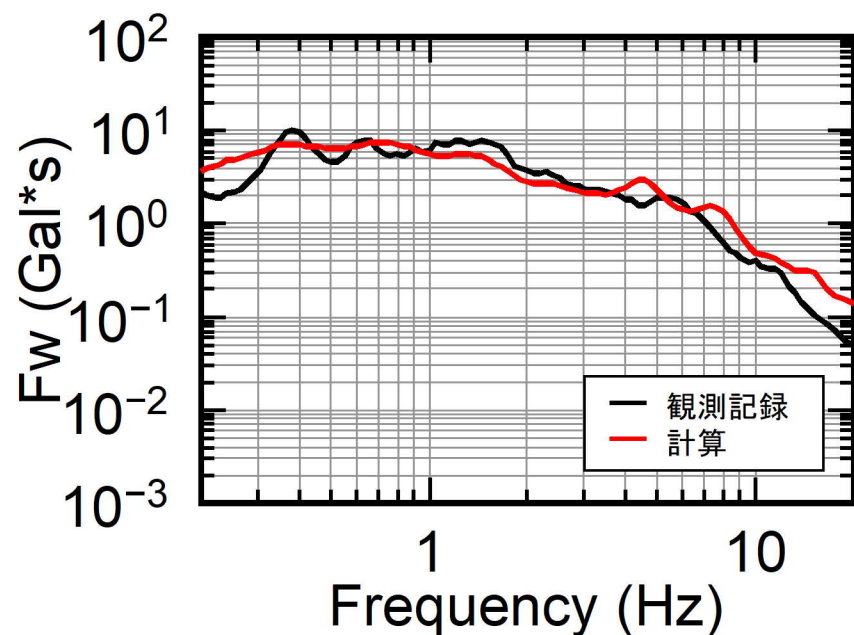
⑱熊本県熊本地方の地震

残差の空間分布の例

## 2. 検討状況を踏まえた考察

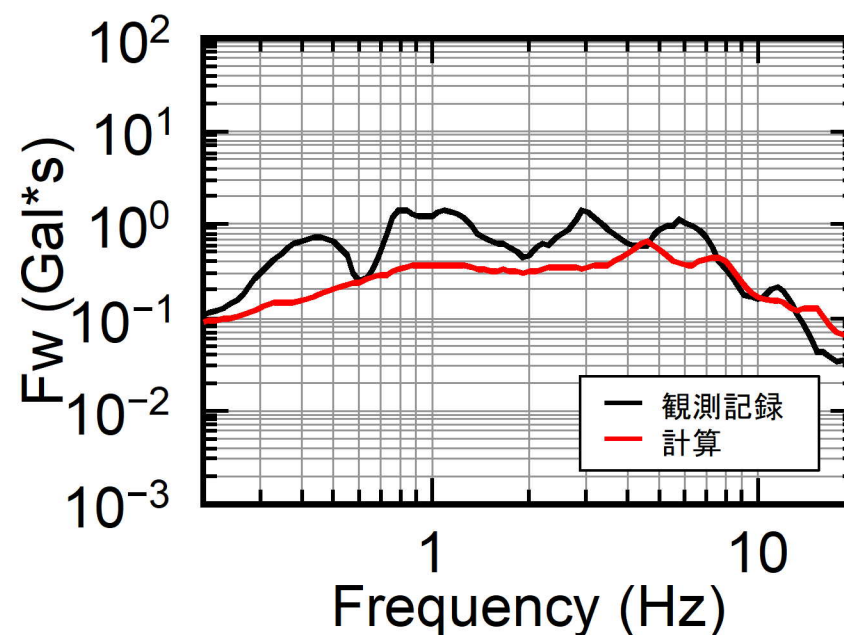
### ■ 友澤ほか（2021）によるブロックインバージョン結果を用いた検討に用いる地震の選定方針

- 設定した地下構造モデルの妥当性確認を適切に実施するため、観測 $O_{mn}(f)$ と計算 $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ が1.0に近い地震を選定する方針とする。
- 破壊伝播効果の影響を受けている地震（例：⑬熊本県熊本地方の地震）などでは、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

⑬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

### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

- ◆ 「2. 検討状況を踏まえた考察」において、応答波が観測記録を下回っている原因は、「残差」の考慮の有無と考えられるため、「残差」が1.0に近いものを選定する方針としたが、妥当性の確認に用いる地震が限られるため、すべての地震を用いて確認する方法について検討を実施。



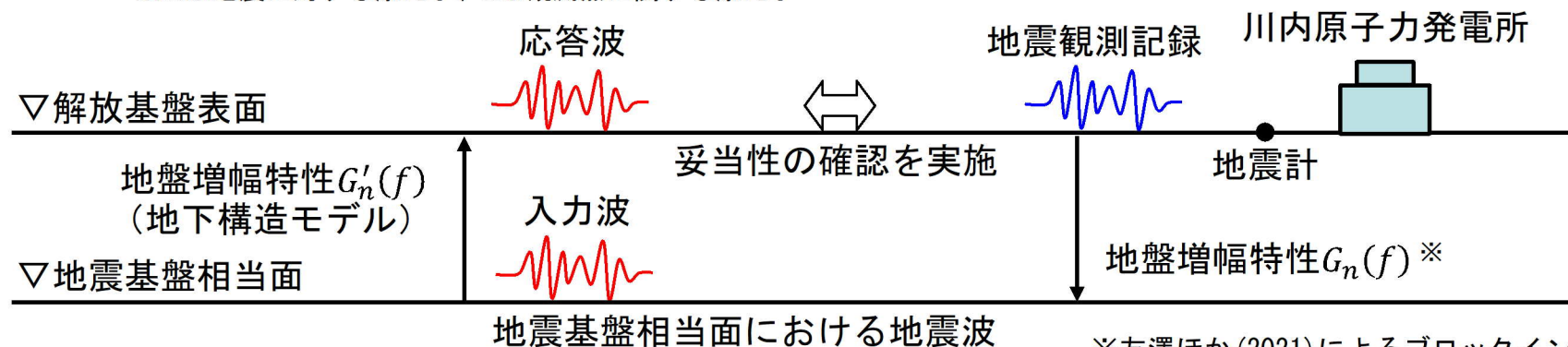
### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた検討

- 前章を踏まえ、残差 $E_{mn}(f)$ が1.0から乖離した地震も含めた20地震を用いて妥当性を確認するため、以下の方法により算出した応答波と観測記録とを比較。本方法における応答波のフーリエ振幅スペクトル $C'_{mn}(f)$ は、下式の通り表され、残差 $E_{mn}(f)$ が含まれる。
  - 敷地の地表面における地震観測記録から友澤ほか(2021)<sup>1)</sup>による地盤増幅特性（経験的地盤増幅率）を除いて、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。

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

※ $m$ は地震に対する添え字、 $n$ は観測点に関する添え字



### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 友澤ほか（2021）の地盤増幅特性により引き戻した地震基盤波を用いた検討に用いる地震

- 前頁の通り、本方法では観測記録がある地震であれば地震基盤波の作成が可能。
- 網羅性の観点から、伝達関数（周波数依存型）による地盤減衰（Q値）の検討等に用いている20地震について検討を実施。
- 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。

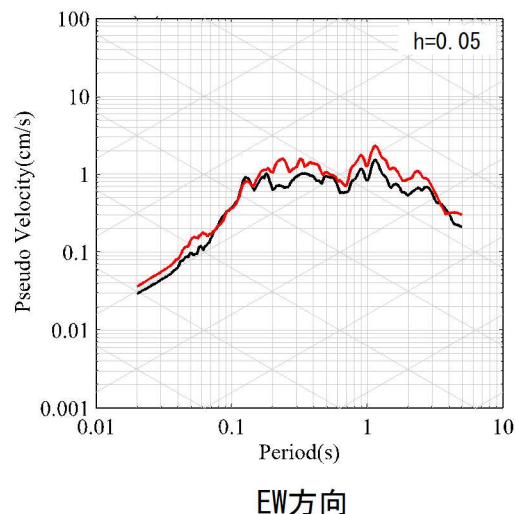
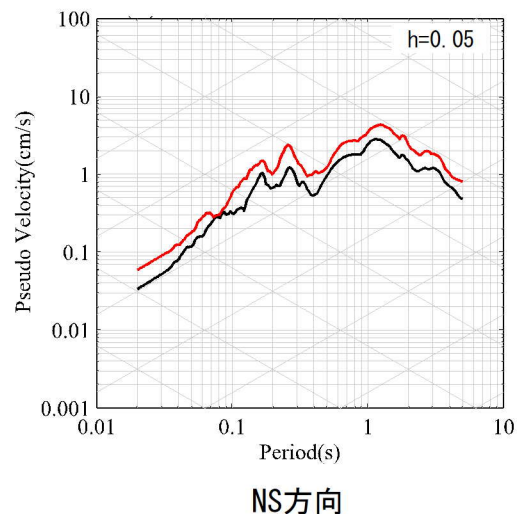
妥当性確認に用いる地震諸元（計20地震）

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

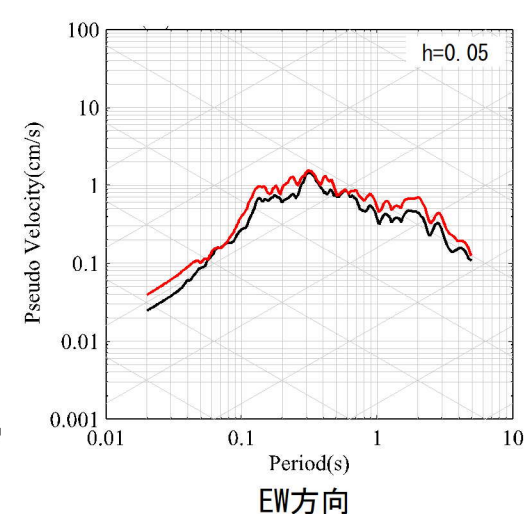
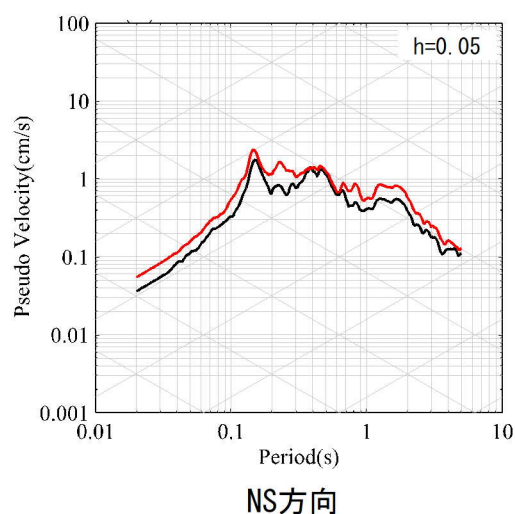
### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (1/5)

①九州西側海域

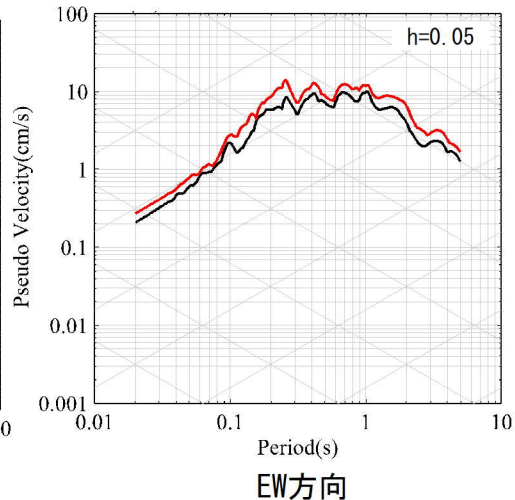
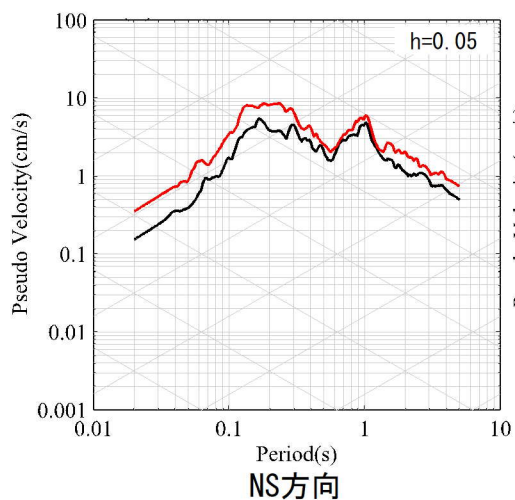


②鹿児島県北西部

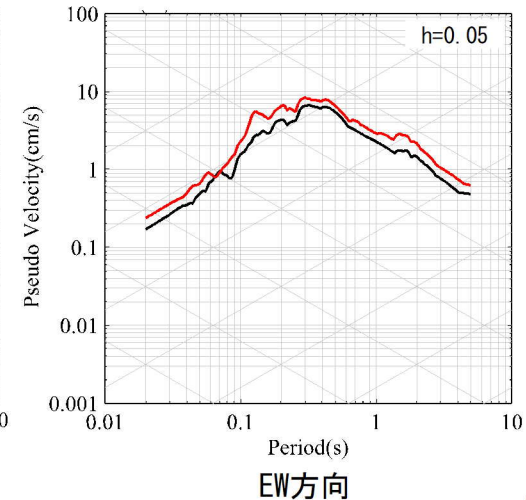
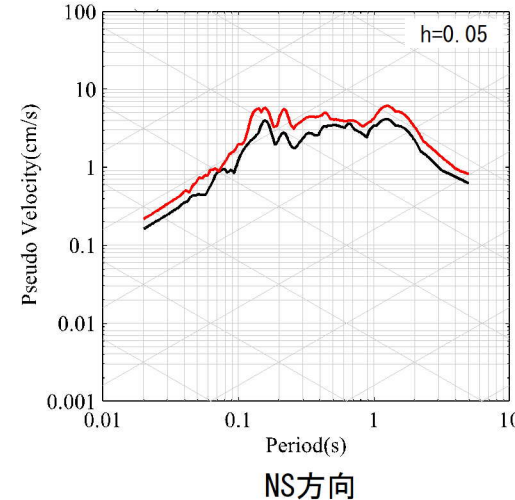


— 観測記録 EL. -18.5m  
— 応答波 EL. -18.5m

③鹿児島県北西部 (1997年3月本震)



④鹿児島県北西部

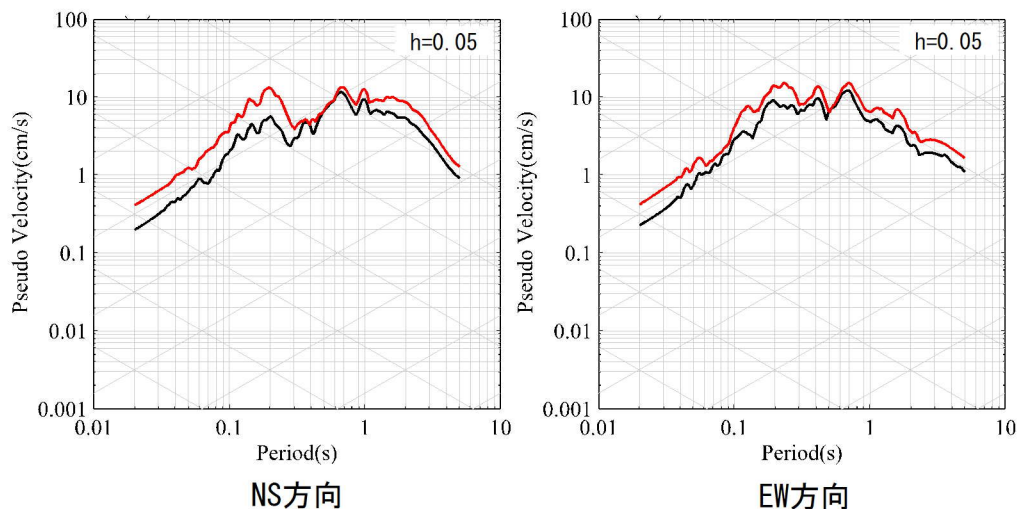




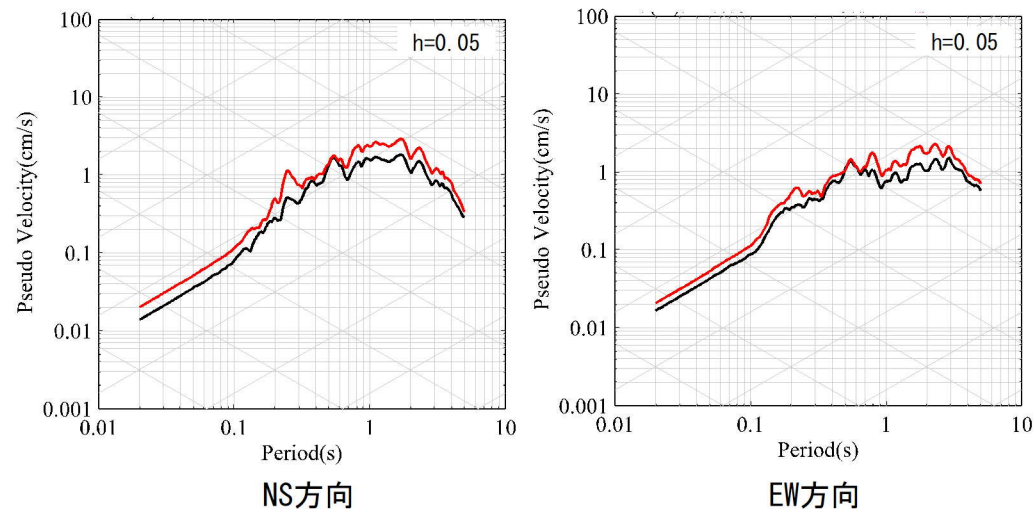
### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (2/5)

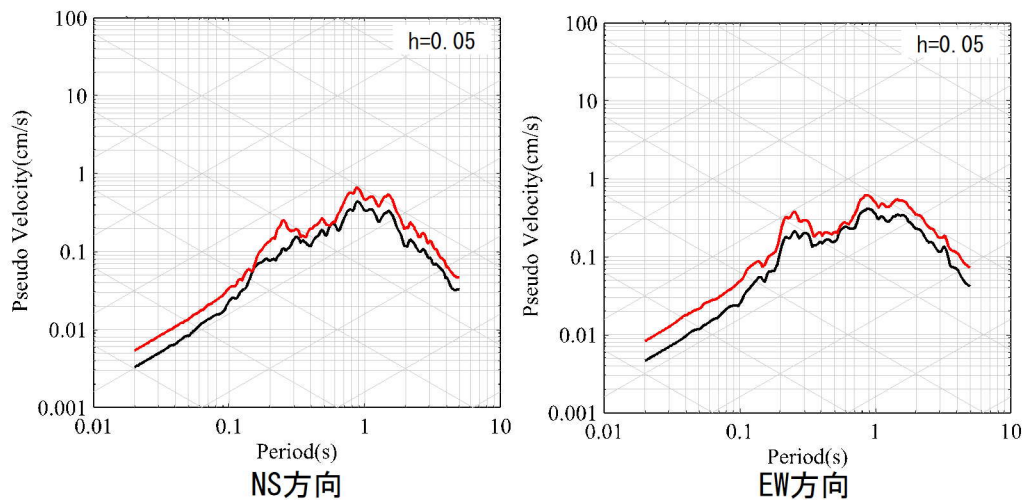
⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)



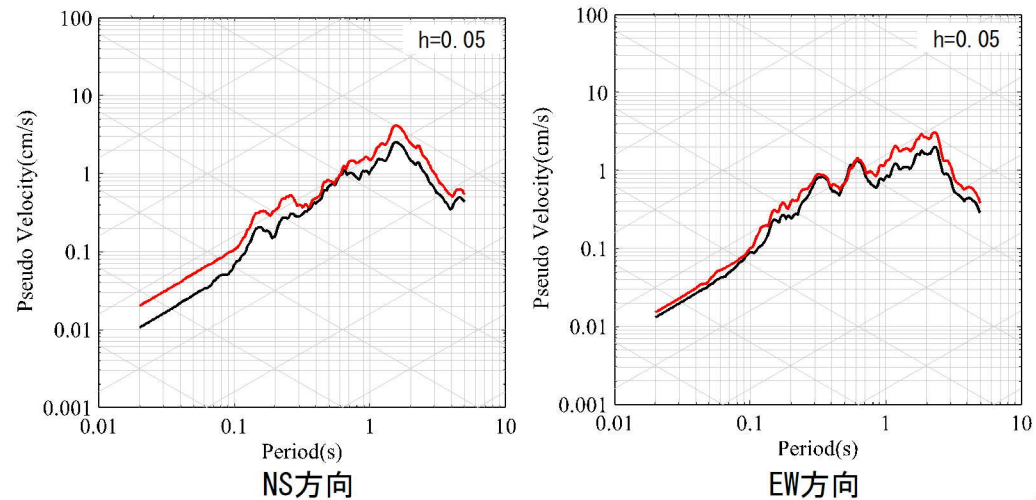
⑥ 薩摩半島西方沖



⑦ 薩摩半島西方沖



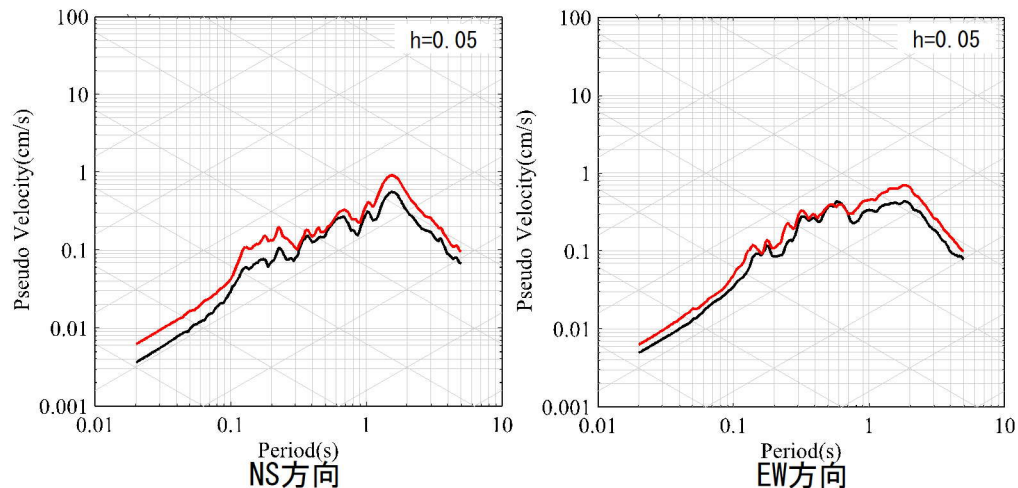
⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



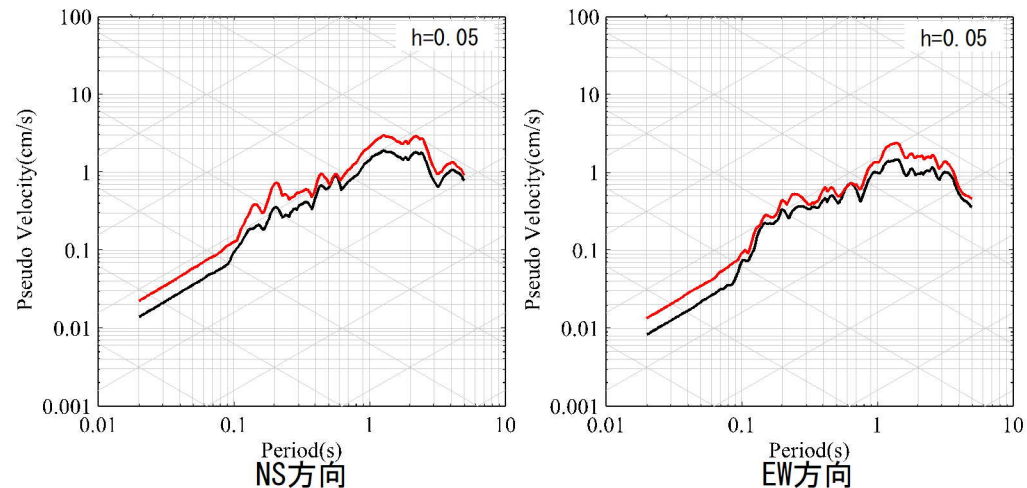
### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (3/5)

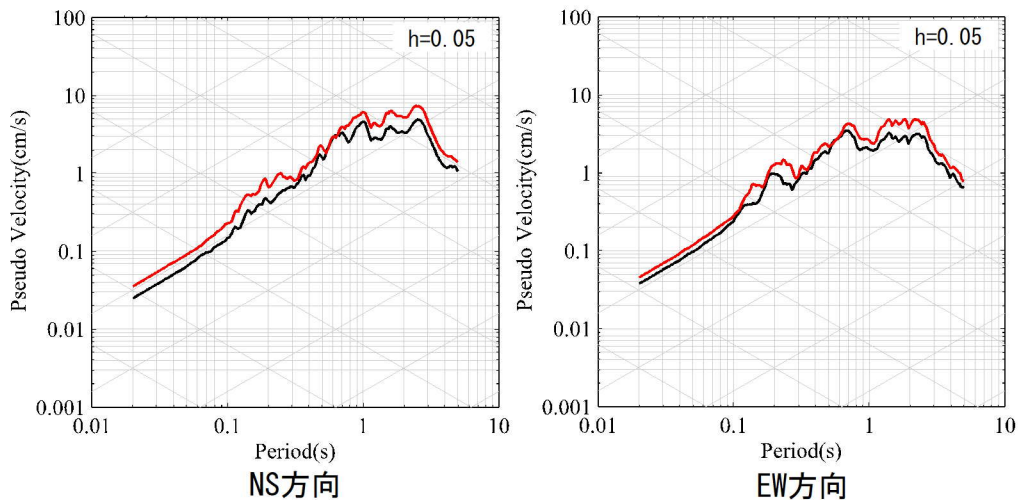
⑨ 熊本県熊本地方



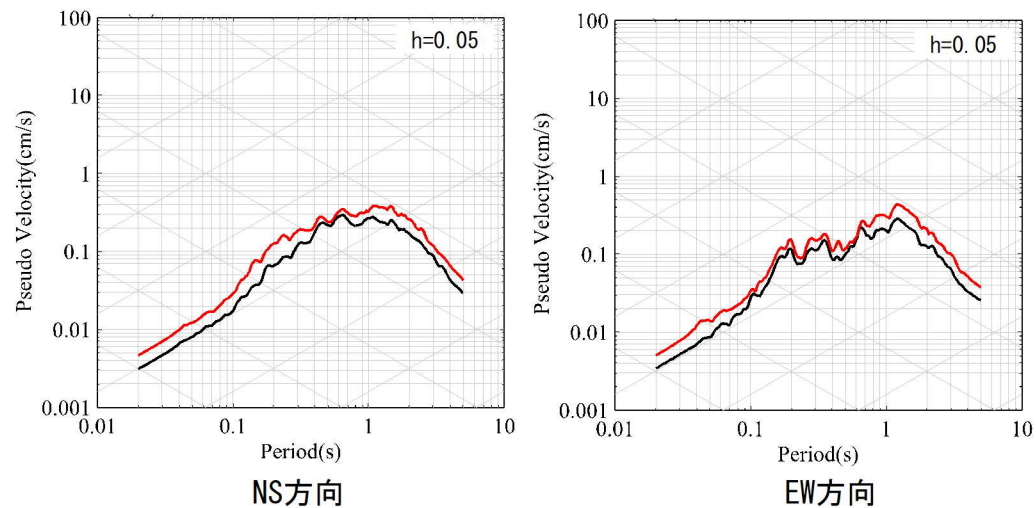
⑩ 熊本県熊本地方



⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



⑫ 熊本県熊本地方

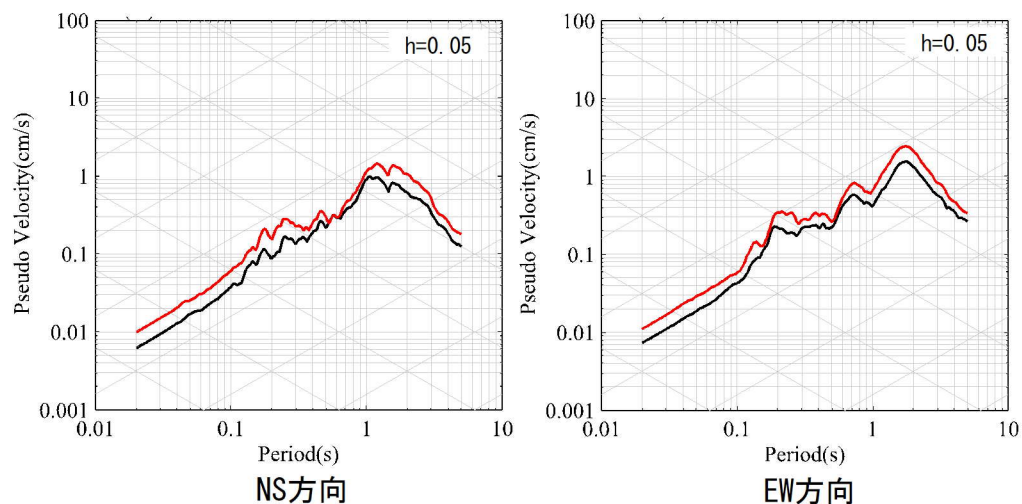




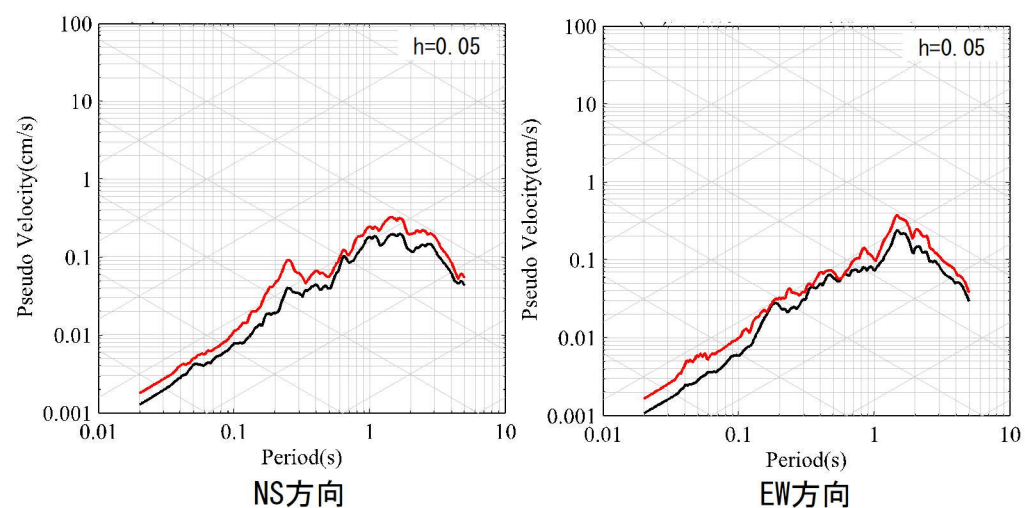
### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (4/5)

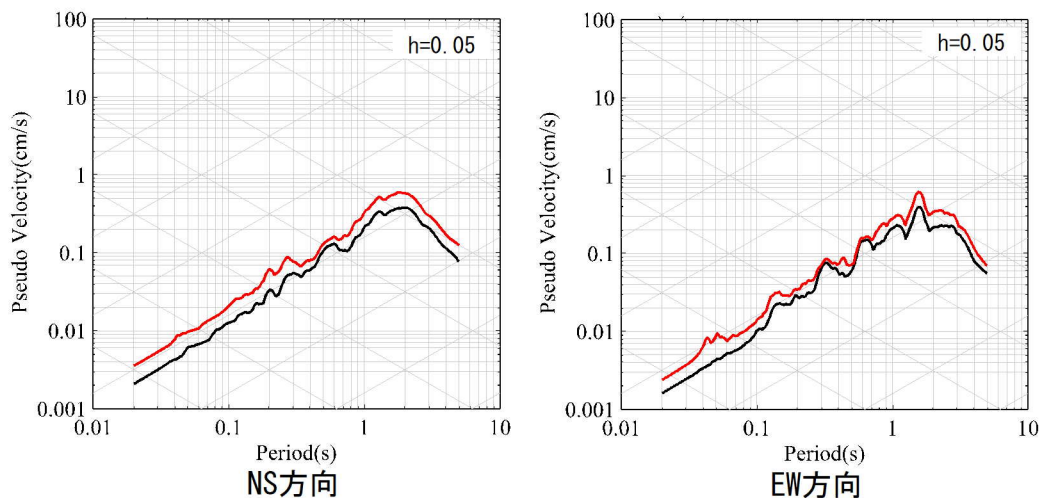
⑬熊本県熊本地方



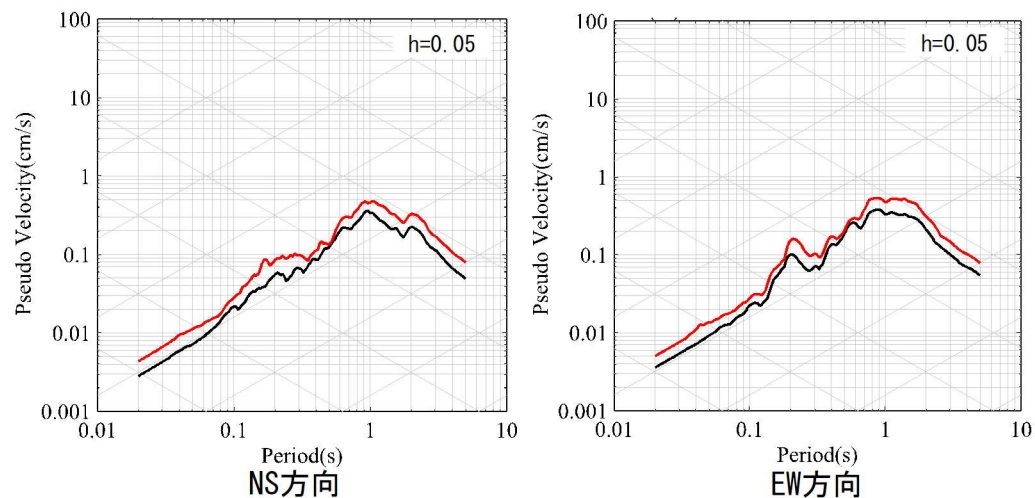
⑭熊本県阿蘇地方



⑮熊本県阿蘇地方



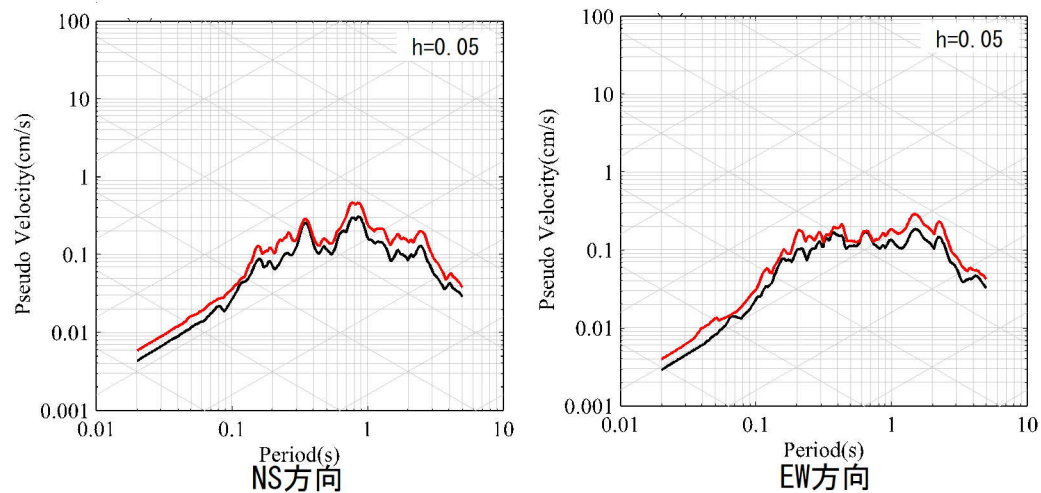
⑯熊本県熊本地方



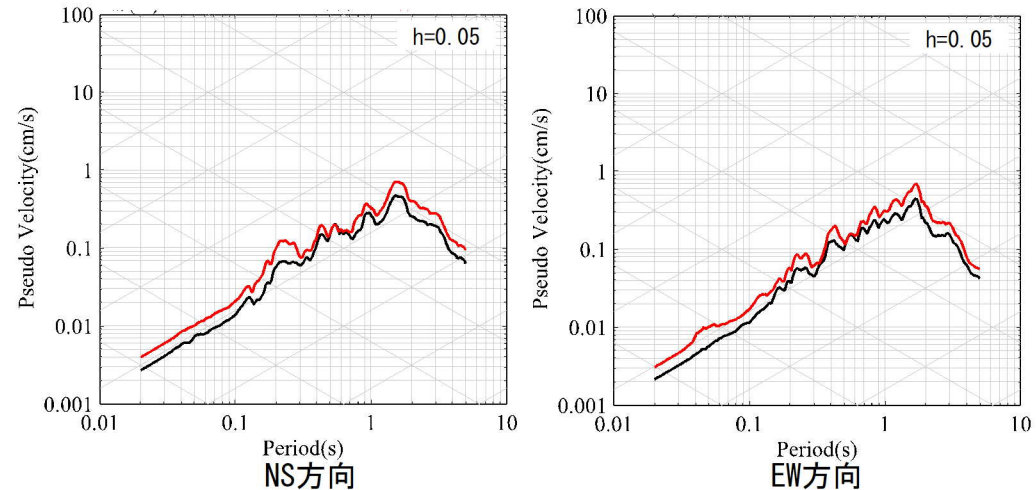
### 3. 経験的地盤増幅率により引き戻した地震基盤波を用いた妥当性確認

#### ■ 応答スペクトルの比較結果 (5/5)

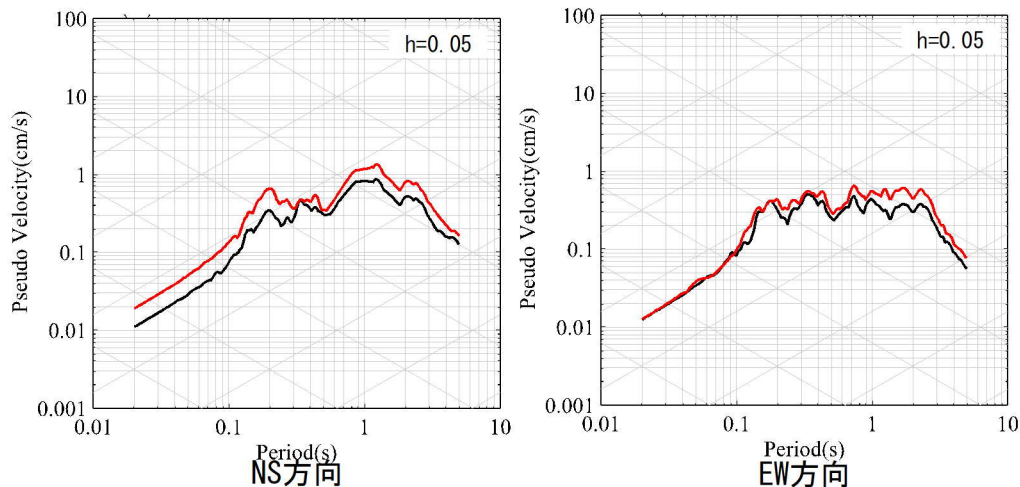
⑰ 熊本県熊本地方



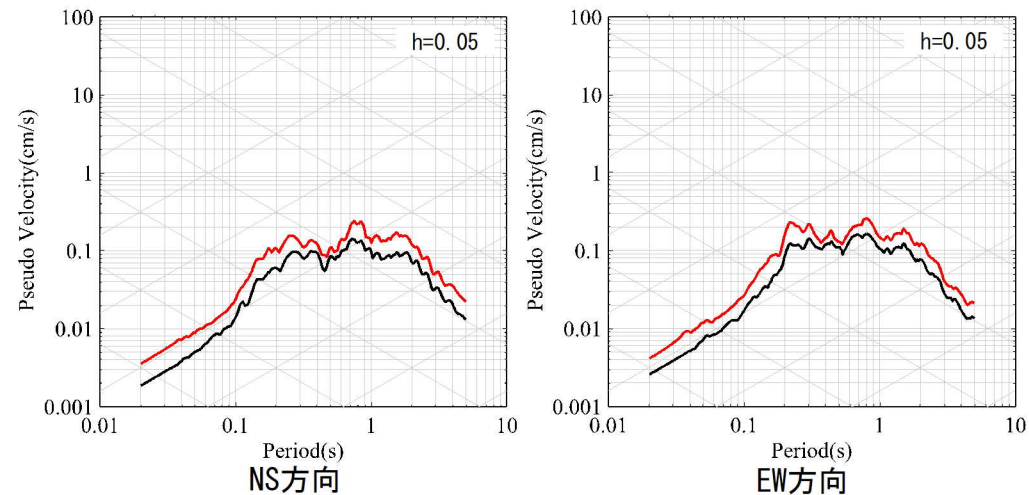
⑱ 熊本県阿蘇地方



⑲ 熊本県熊本地方



⑳ 薩摩半島西方沖



## 【参考】玄海サイトにおける代表2地震の選定の妥当性

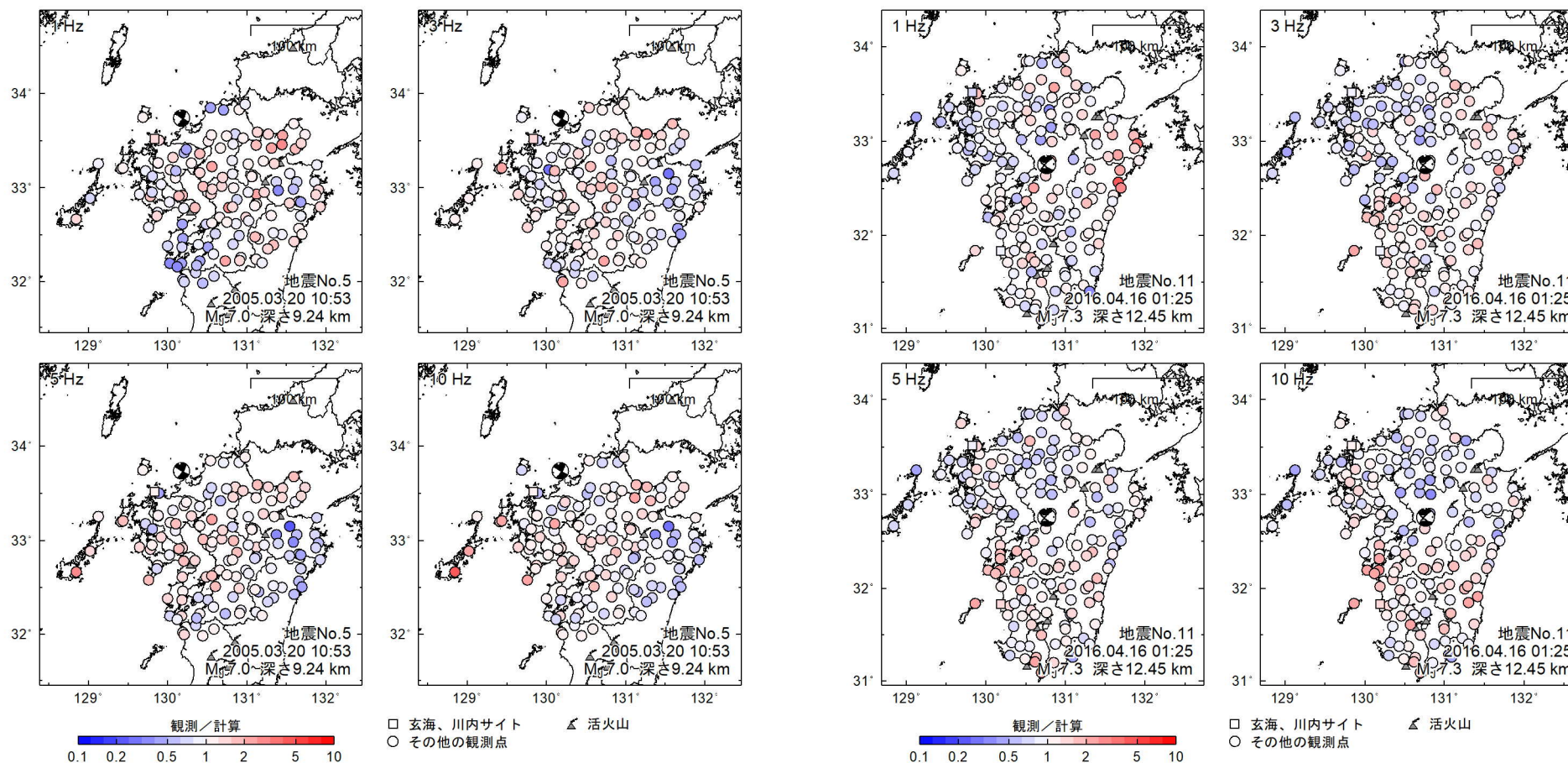
- ◆「2. 検討状況を踏まえた考察」における考察を踏まえ、「残差」が1.0に近い地震を選定していることの確認を実施



# 【参考】玄海サイトにおける代表2地震の選定の妥当性

## ■ 選定した代表2地震における残差の空間分布の確認

- 玄海の地下構造モデル全体の妥当性確認における代表2地震は、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選定している。
- 代表2地震の残差の空間分布を確認すると、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。



2005年3月20日福岡県西方沖地震本震

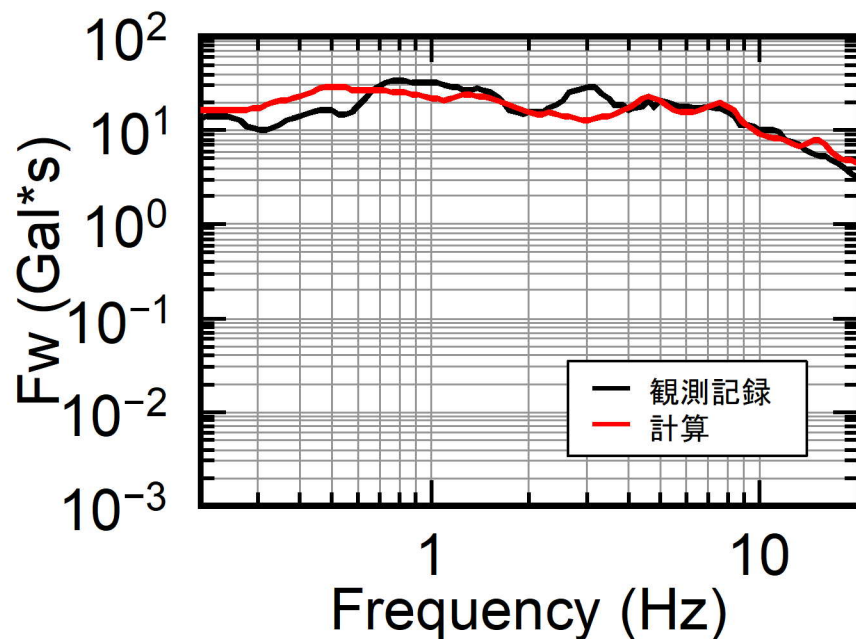
2016年4月16日熊本県熊本地震本震



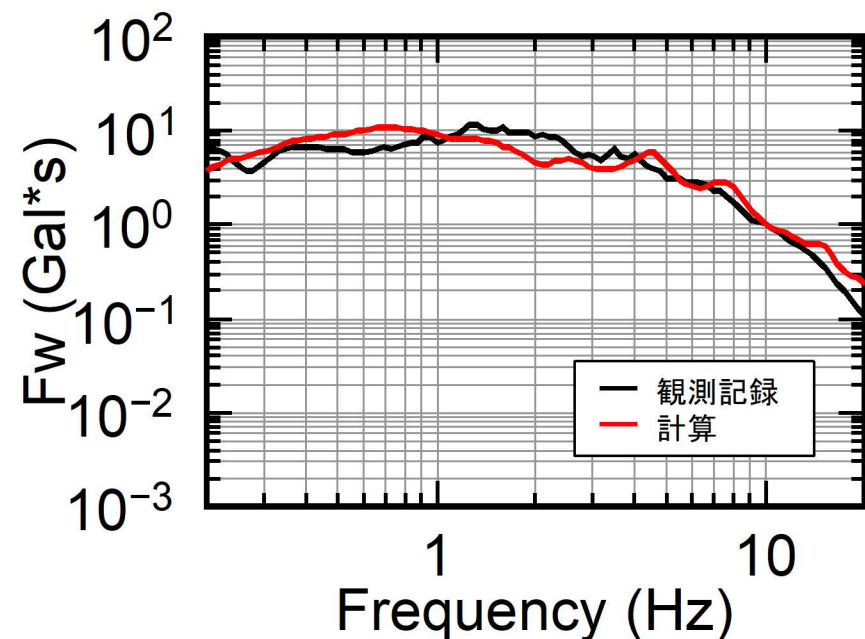
## 【参考】玄海サイトにおける代表2地震の選定の妥当性

### ■ 玄海の代表2地震の選定の妥当性

- 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。
- 以上から、玄海の地下構造モデル全体の妥当性確認における代表2地震の選定は妥当であることを確認。



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.