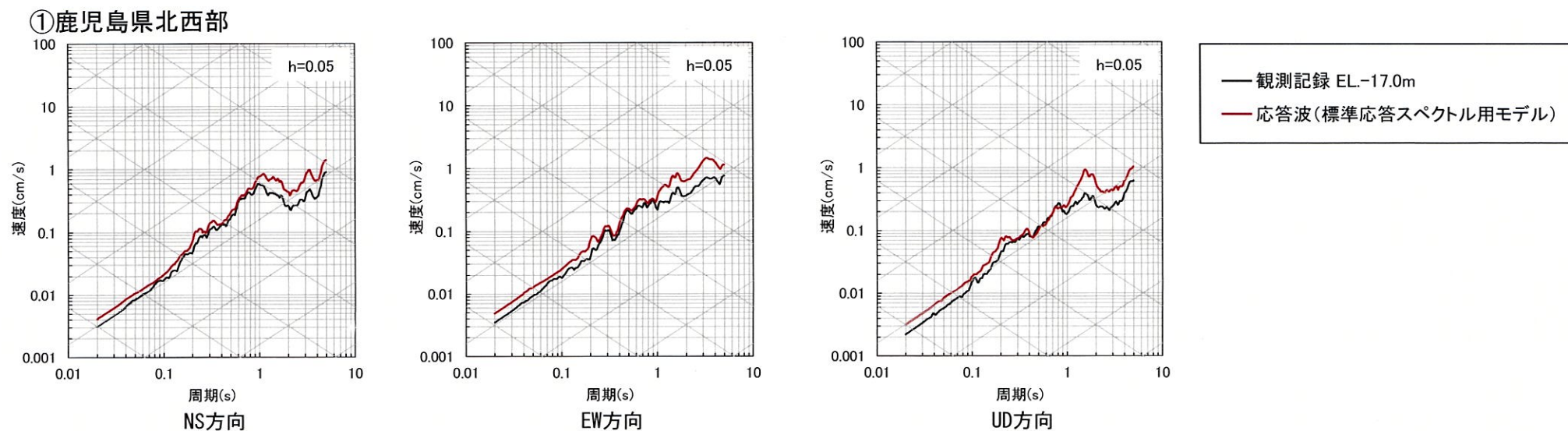


【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

(2) 地盤増幅特性により引き戻した地震波

■ 応答スペクトルの比較結果 (1/10)

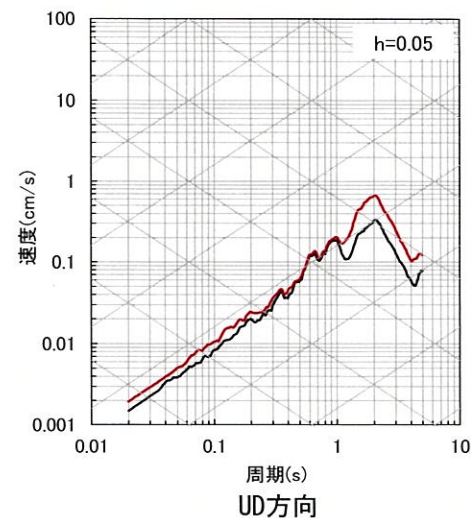
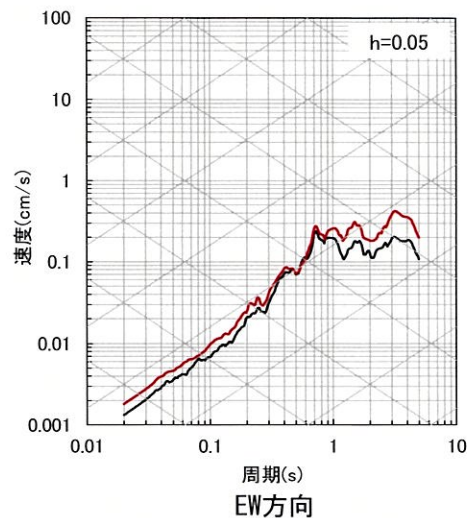
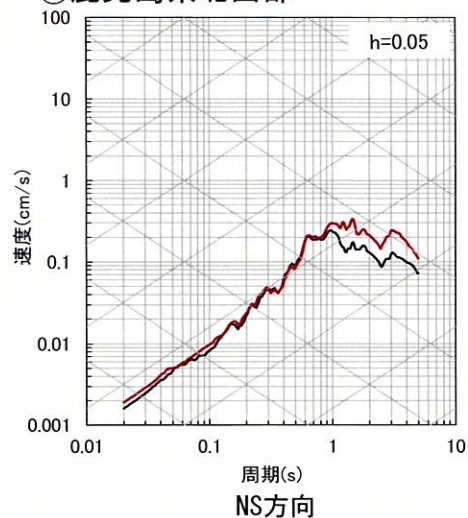
- ・ ブロックインバージョン結果を用いた地震波による応答波の応答スペクトルが、地震観測記録の応答スペクトルと比較して、スペクトル形状が概ね整合しており、過小評価となっていないことを確認した。(280～289頁参照)



【参考⑦】 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

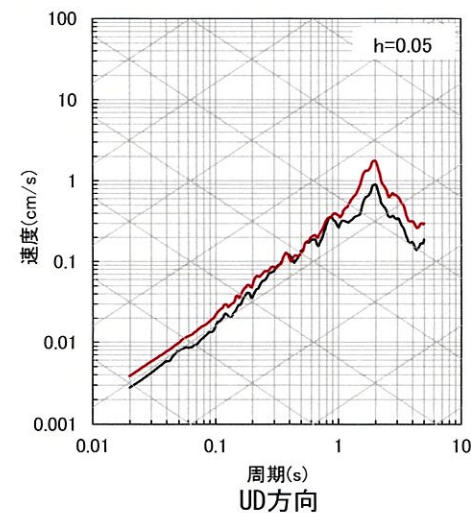
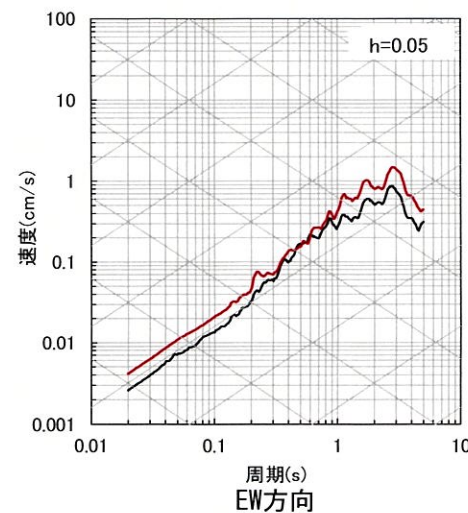
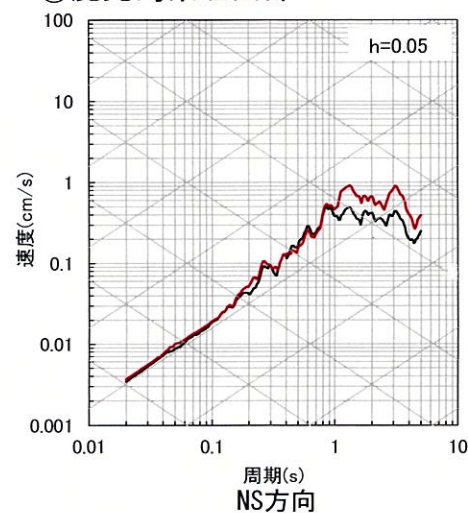
■ 応答スペクトルの比較結果 (2/10)

② 鹿児島県北西部



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

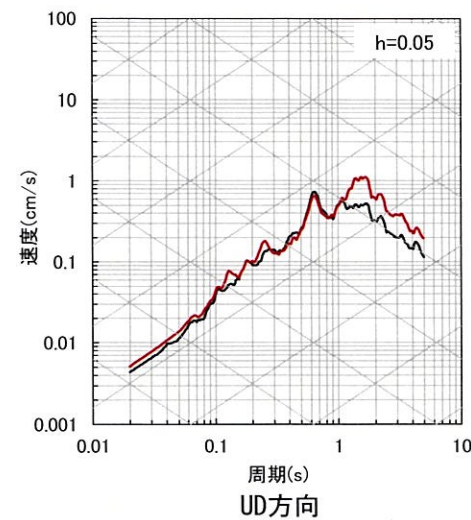
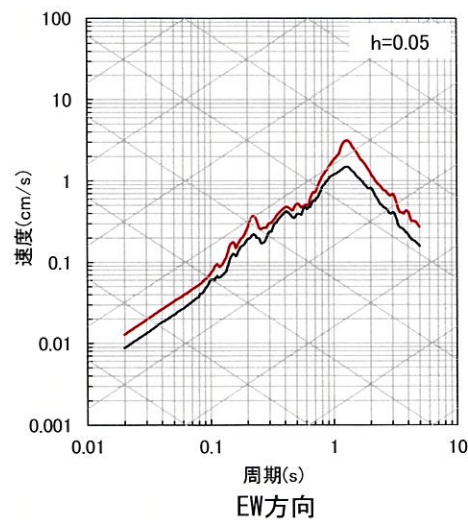
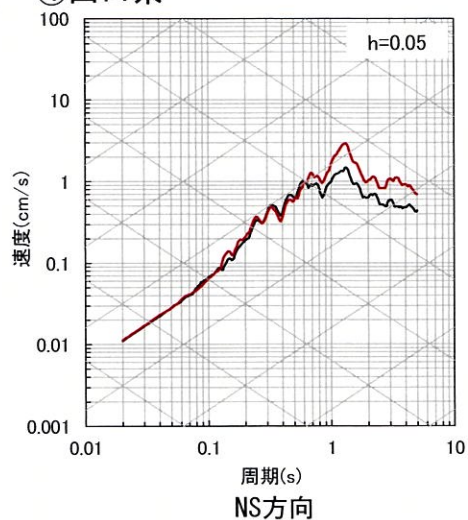
③ 鹿児島県北西部



【参考⑦】 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

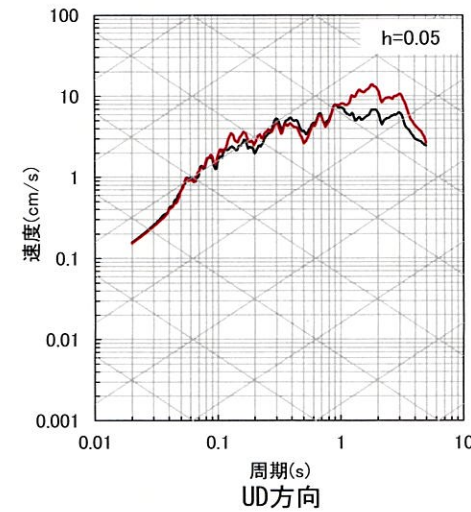
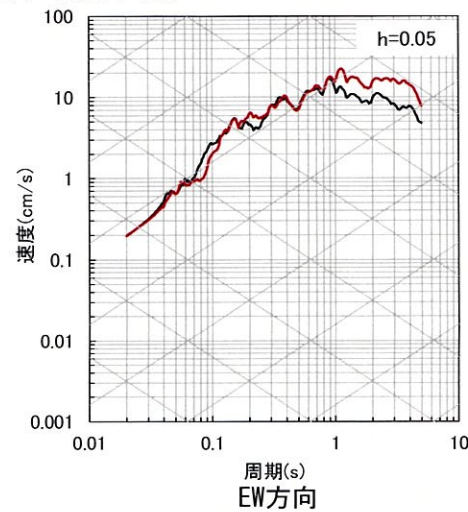
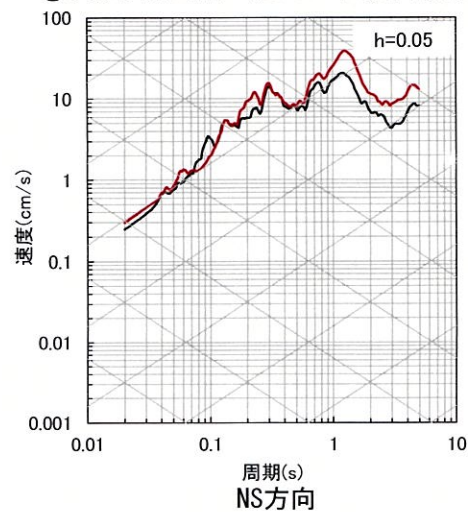
■ 応答スペクトルの比較結果 (3/10)

④ 山口県



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波 (標準応答スペクトル用モデル)

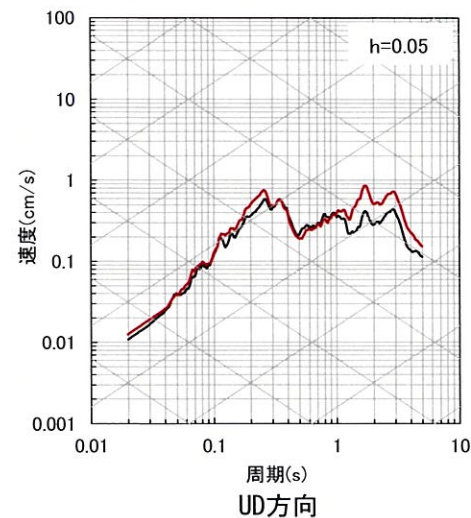
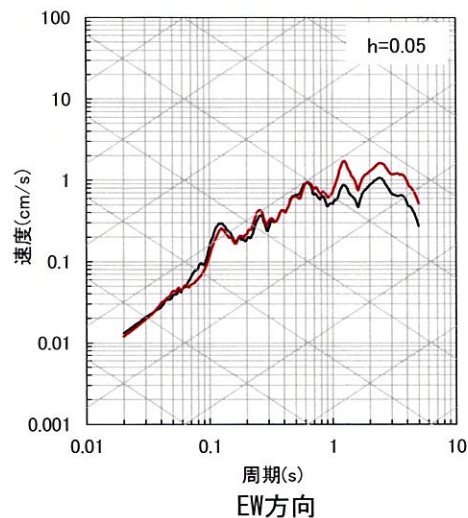
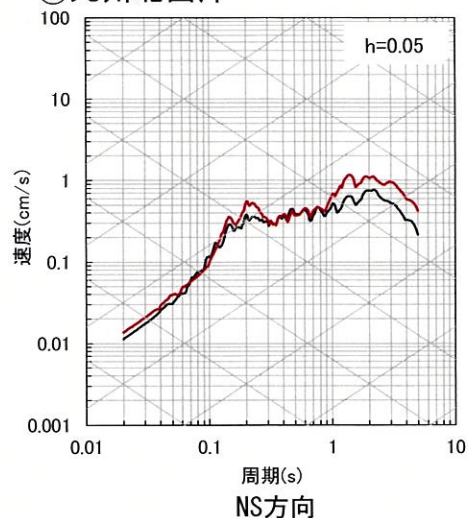
⑤ 九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



【参考⑦】 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

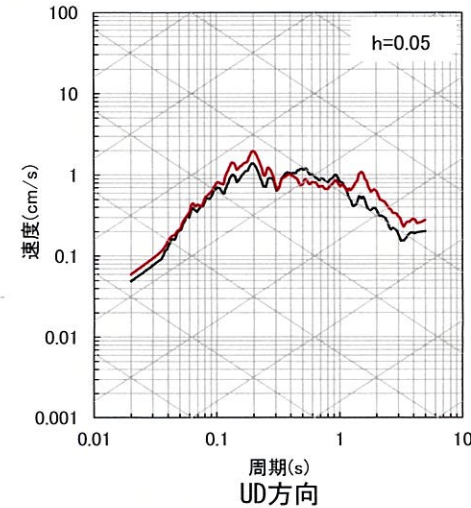
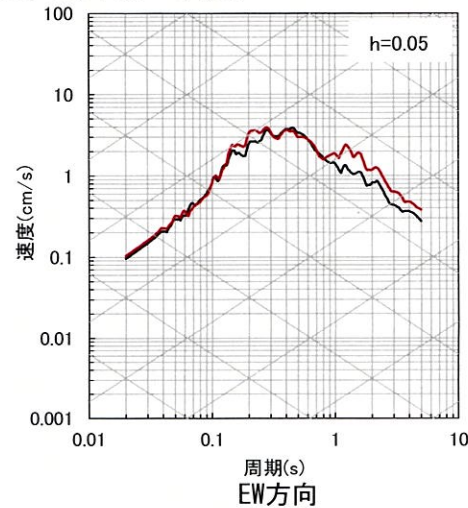
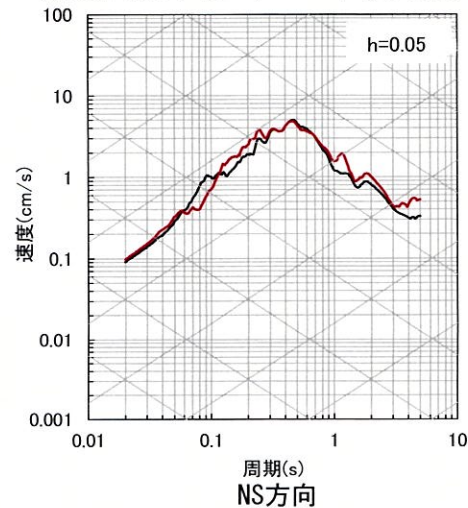
■ 応答スペクトルの比較結果 (4/10)

⑥九州北西沖



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

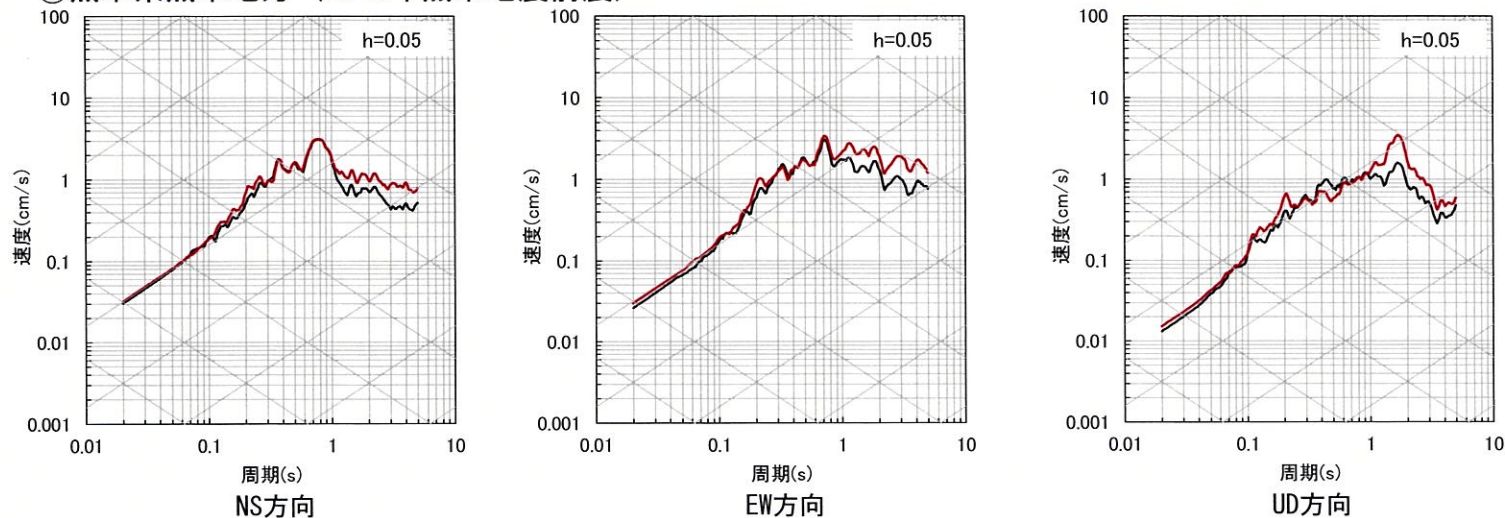
⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



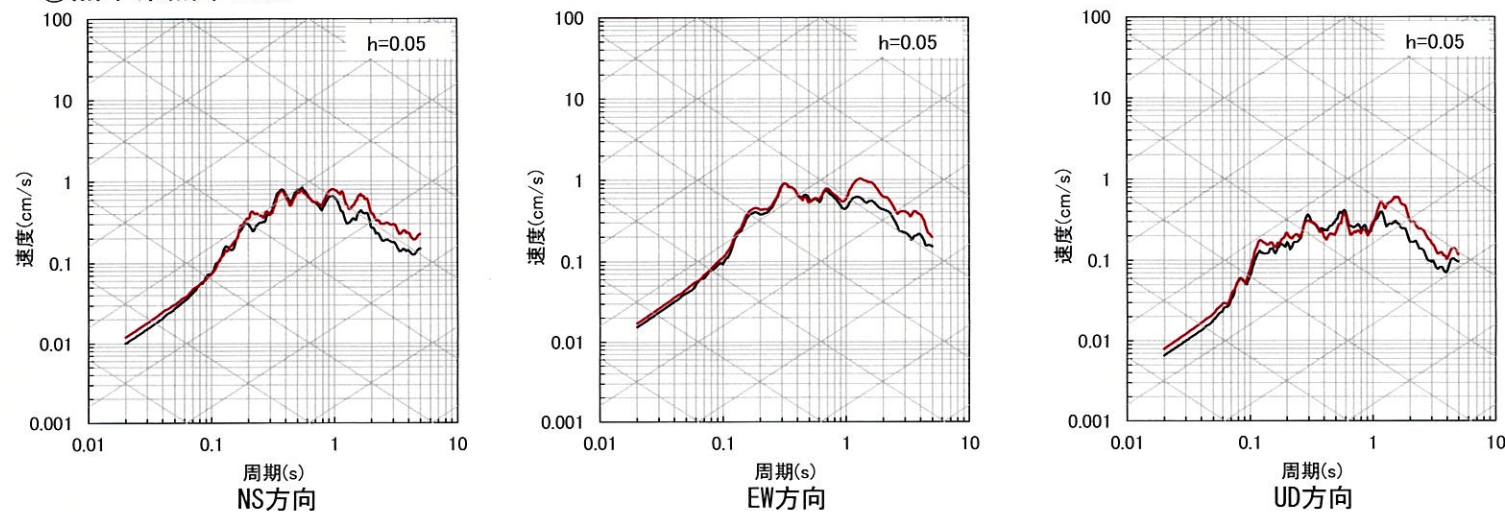
【参考⑦】 ブロックインバージョン結果を用いた地震波による確認

■ 応答スペクトルの比較結果 (5/10)

⑧ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



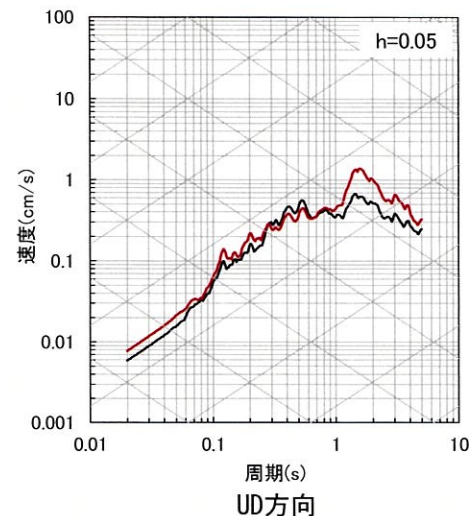
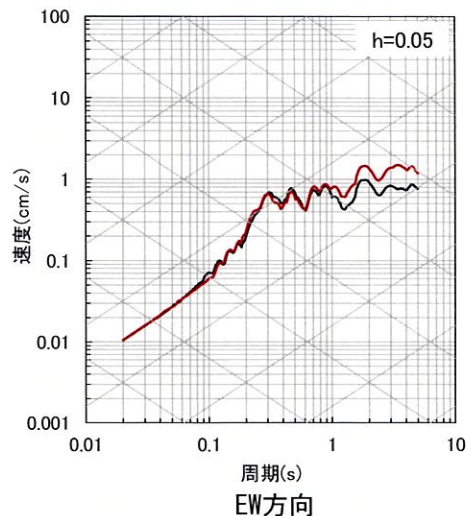
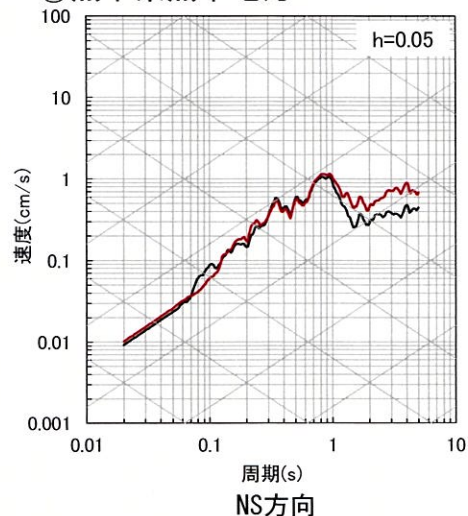
⑨ 熊本県熊本地方



【参考⑦】 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

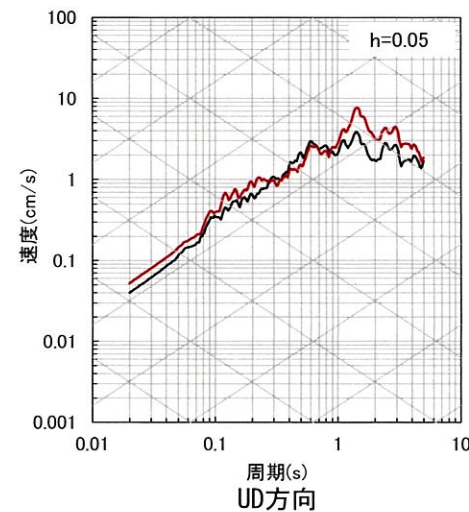
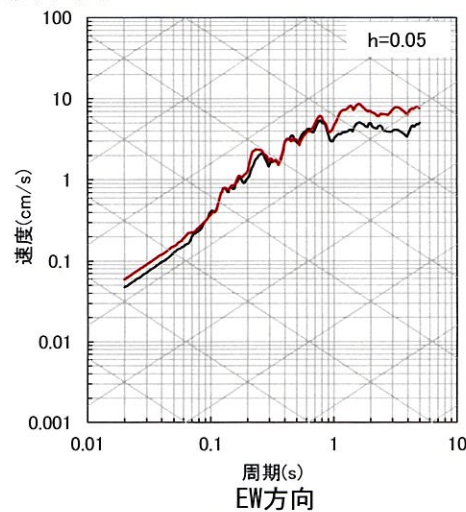
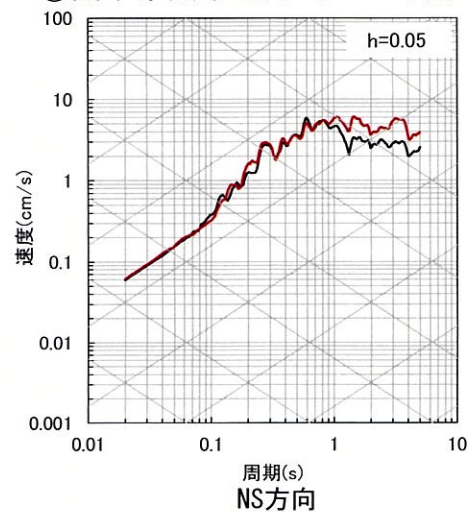
■ 応答スペクトルの比較結果 (6/10)

⑩ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

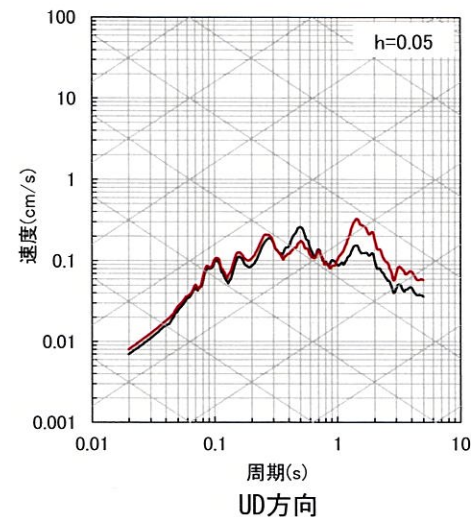
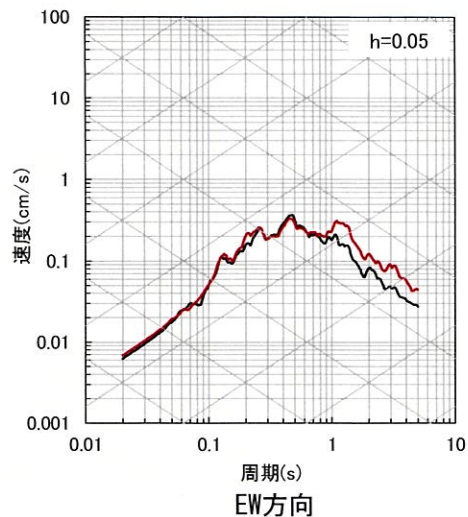
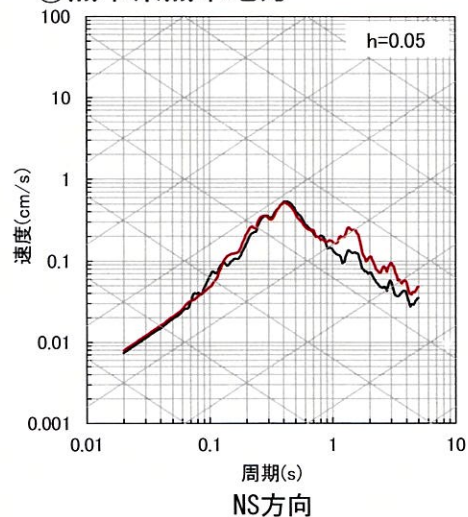
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



【参考⑦】 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

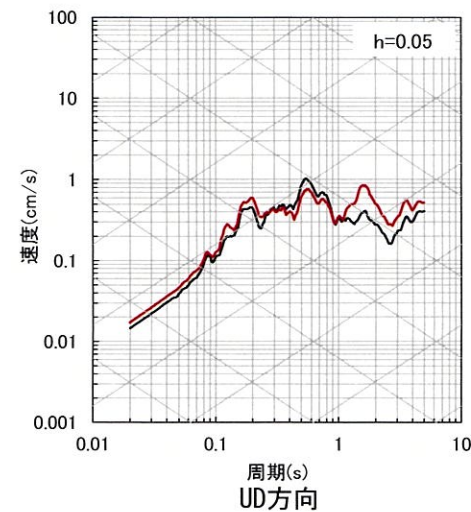
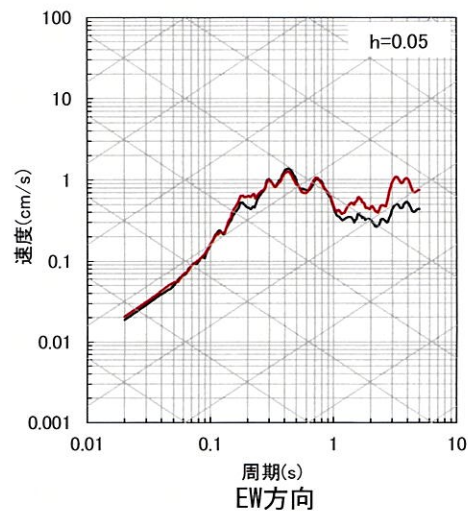
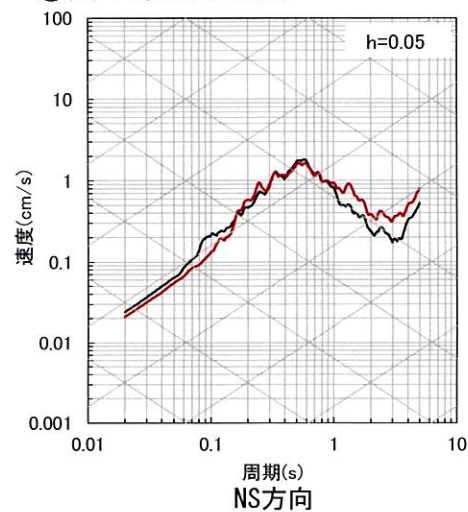
■ 応答スペクトルの比較結果 (7/10)

⑫ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波 (標準応答スペクトル用モデル)

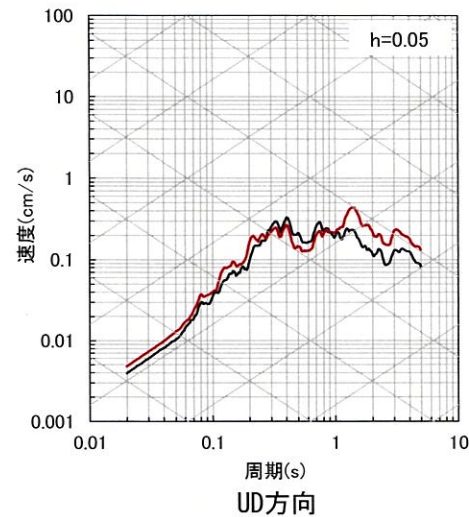
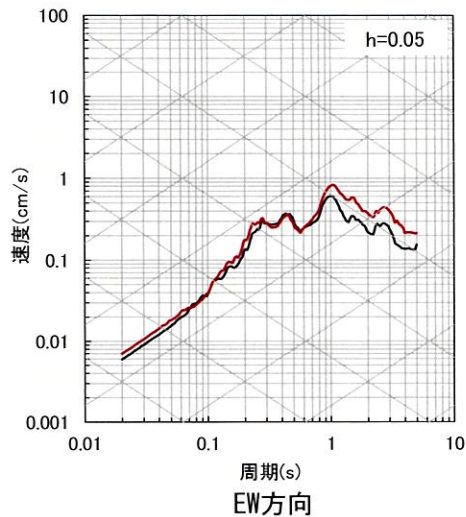
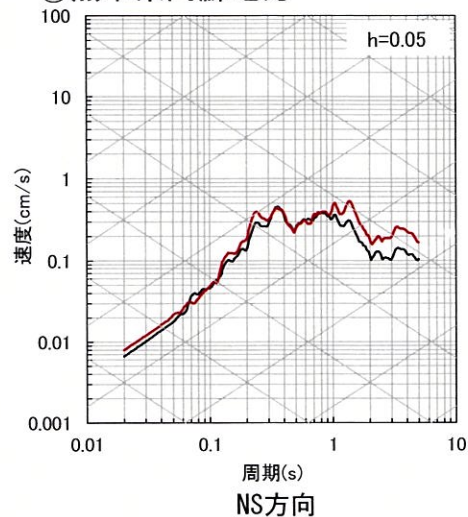
⑬ 熊本県熊本地方



【参考⑦】 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

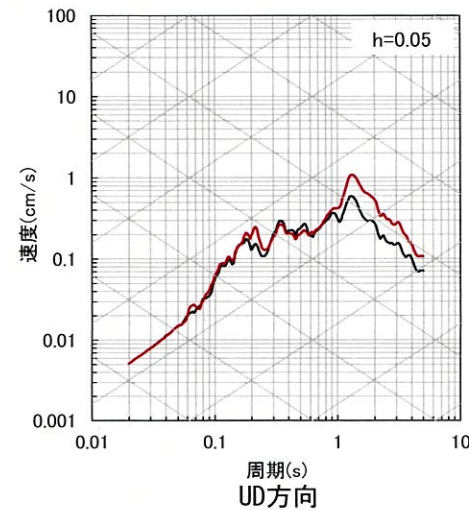
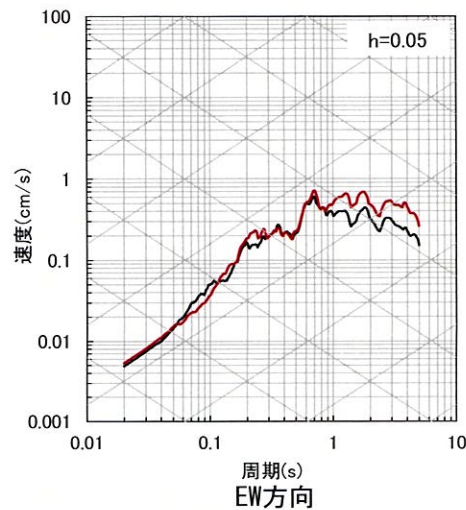
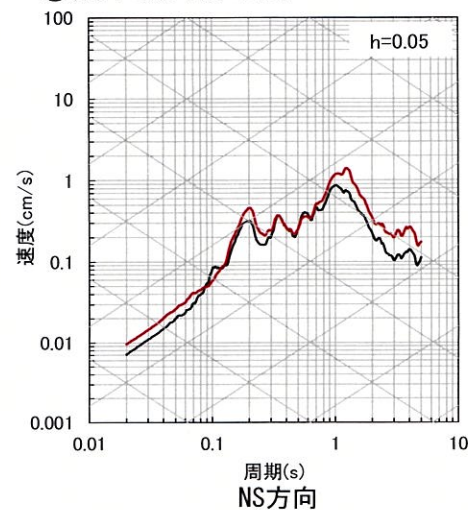
■ 応答スペクトルの比較結果 (8/10)

⑭ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

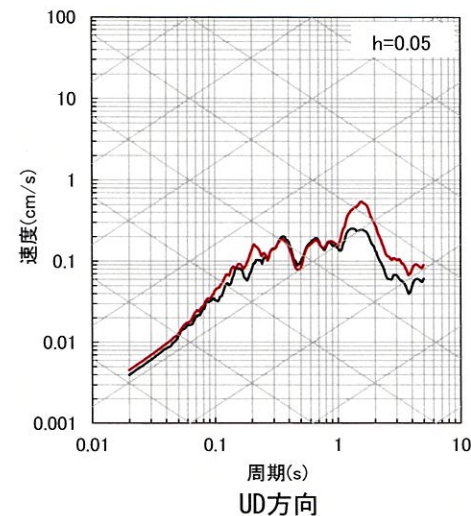
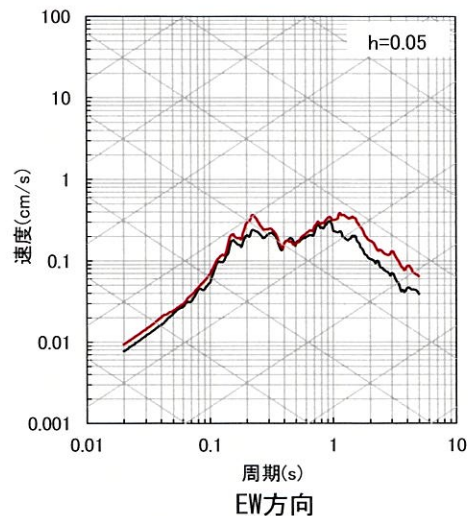
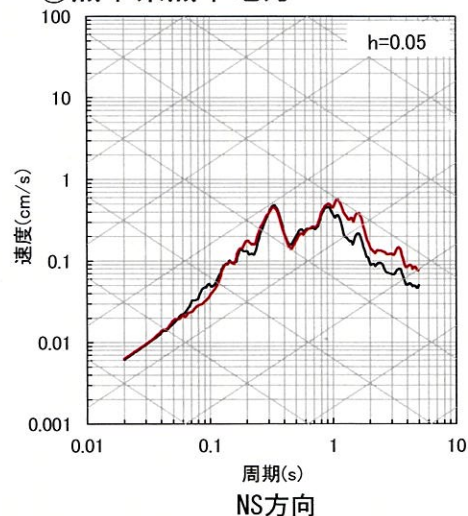
⑮ 熊本県阿蘇地方



【参考⑦】 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

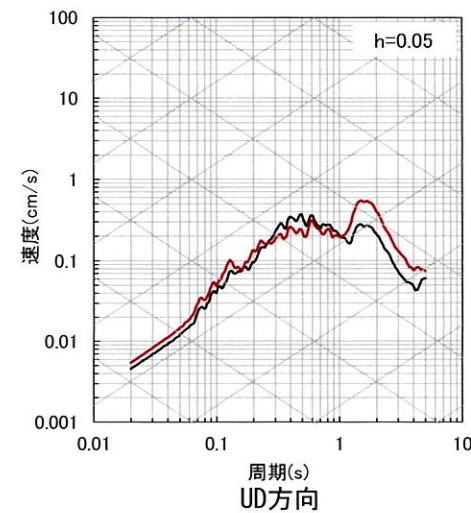
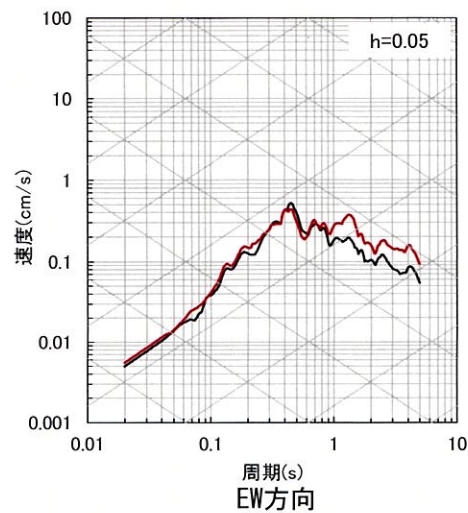
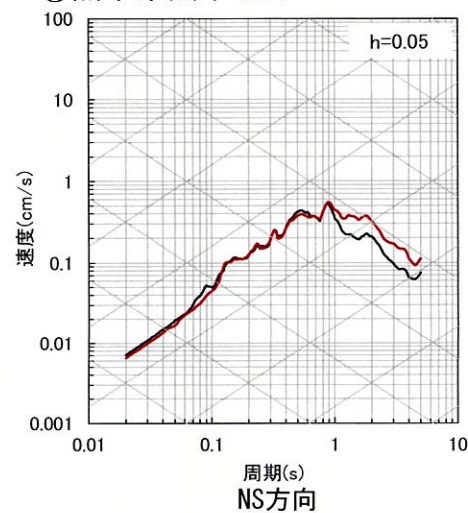
■ 応答スペクトルの比較結果 (9/10)

⑩ 熊本県熊本地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波(標準応答スペクトル用モデル)

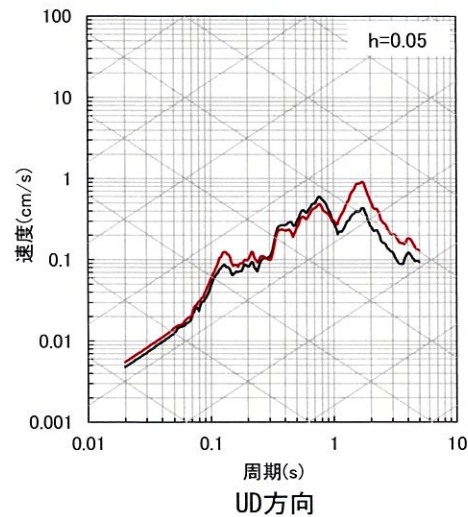
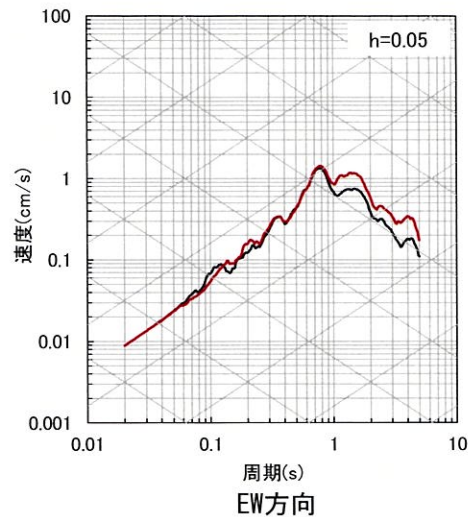
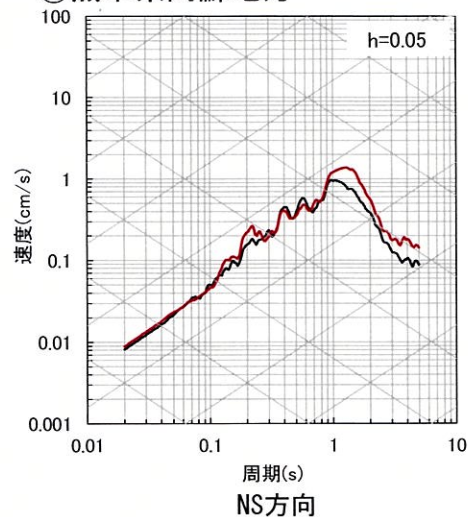
⑪ 熊本県熊本地方



【参考⑦】 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

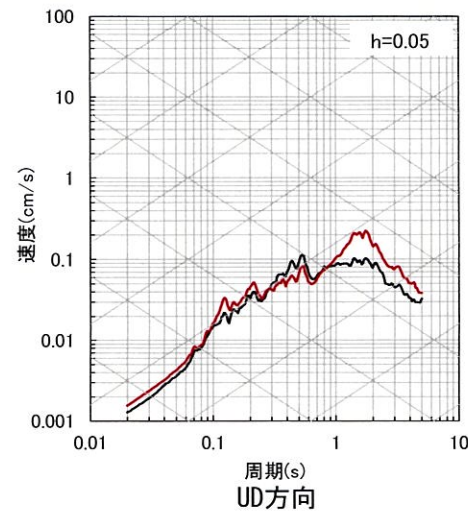
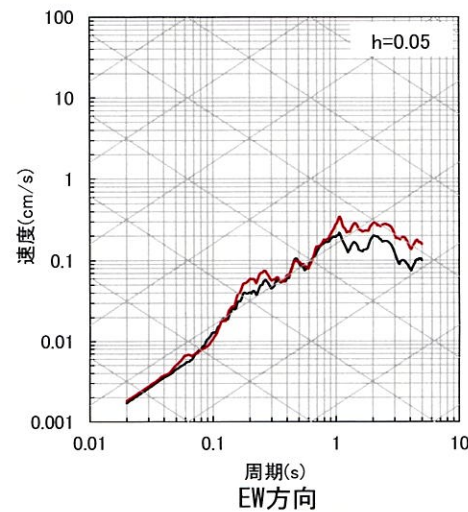
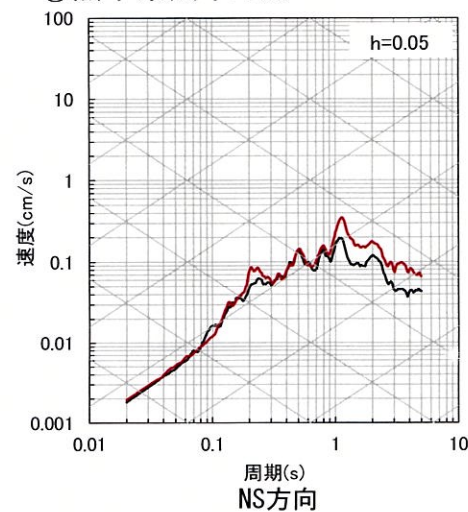
■ 応答スペクトルの比較結果 (10/10)

⑱ 熊本県阿蘇地方



— 観測記録 EL-17.0m
— 応答波 (標準応答スペクトル用モデル)

⑲ 熊本県熊本地方



【参考⑧】 友澤ほか（2021）のブロックインバージョン結果の確認

【参考⑧】 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。

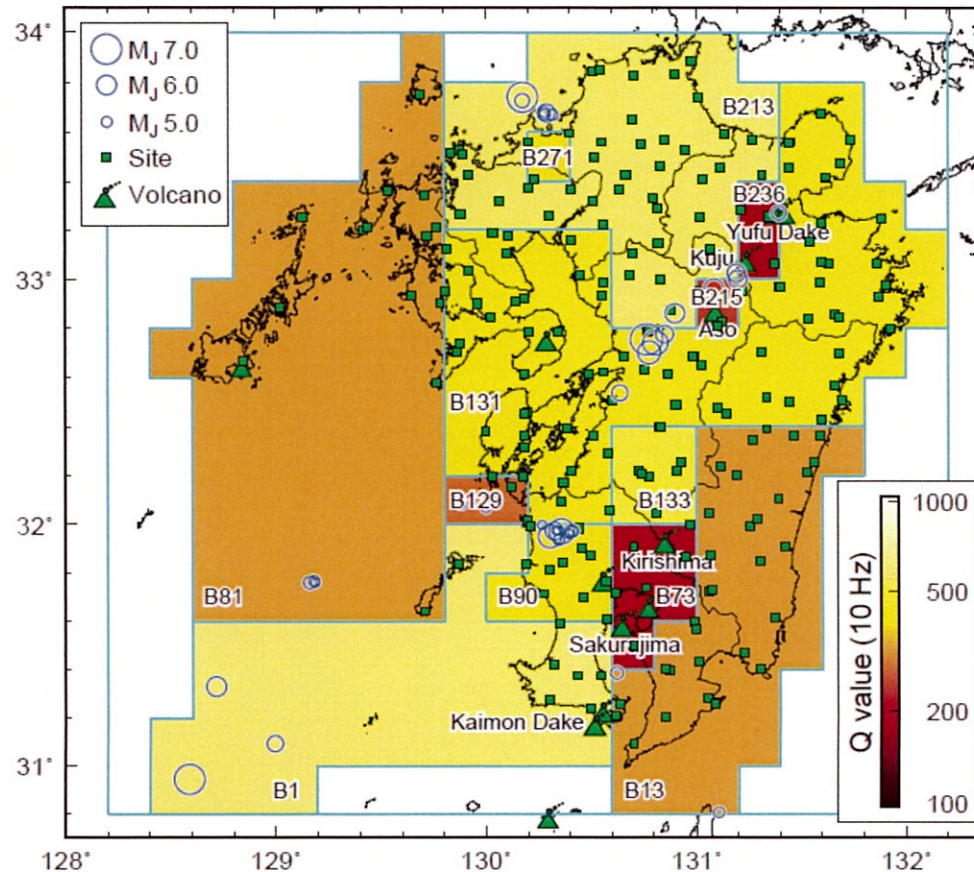


Fig. 4 Estimated inhomogeneous attenuation structure ※友澤ほか（2021）より抜粋

【参考⑧】 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 ω^{-2} モデルとの比較の結果 (Fig. 9)、いずれの地震も ω^{-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)。

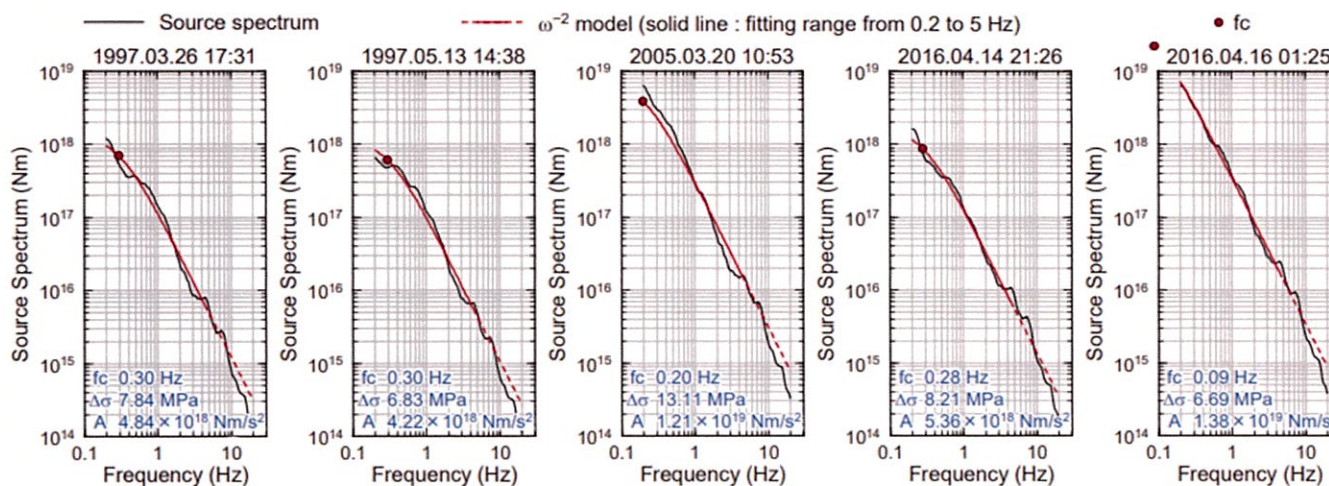


Fig.9 Source spectrum of each earthquake

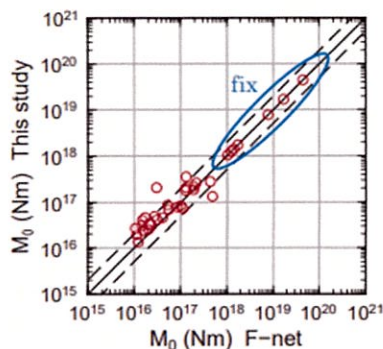


Fig.10 Comparison of M_0 of F-net that of this study

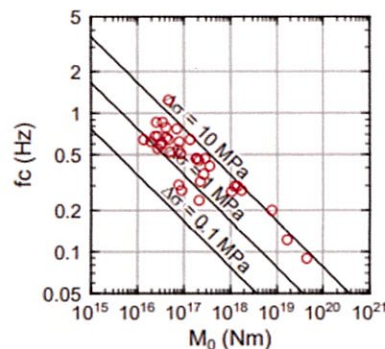


Fig.11 Scaling relation between M_0 and f_c

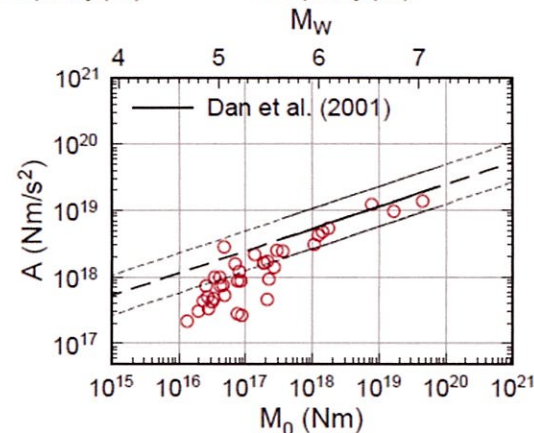


Fig.12 Scaling relation between M_0 and A

※友澤ほか (2021) より抜粋

【参考⑧】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。

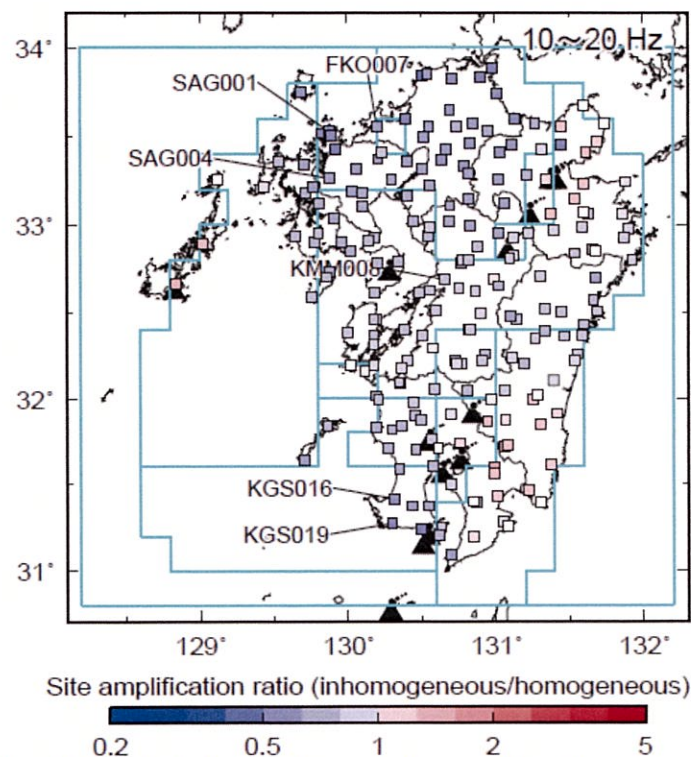


Fig.13 Spatial distribution of site amplification ratio

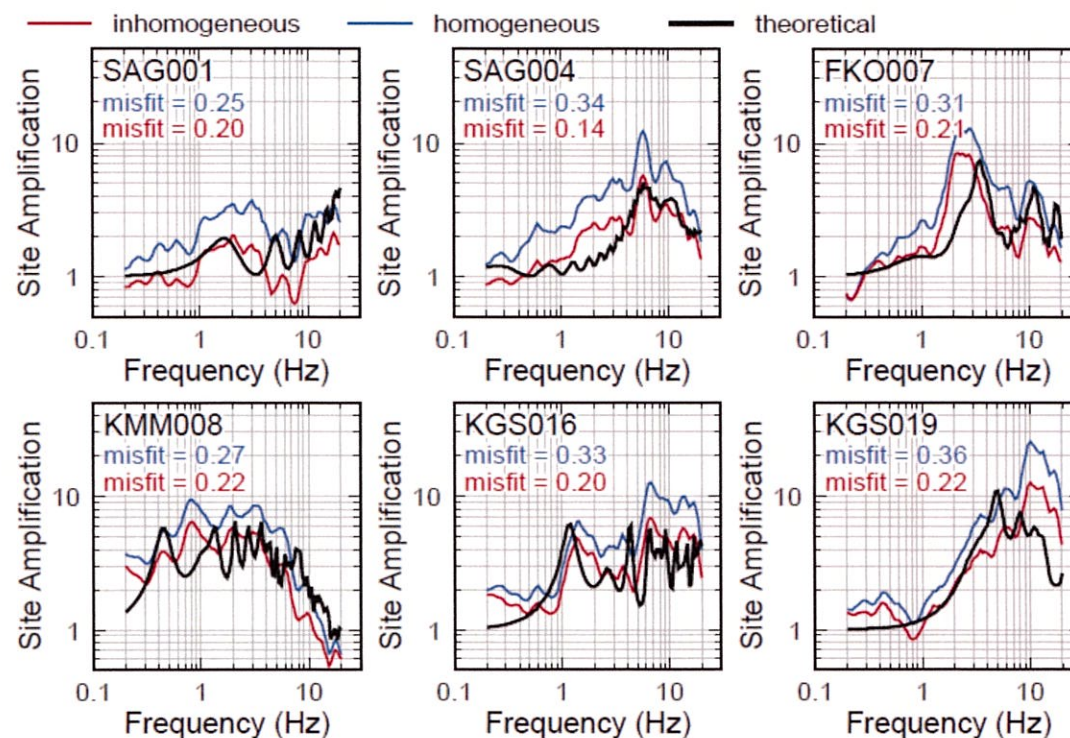


Fig.14 Comparison of estimated and theoretical site amplifications

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

【参考⑨】 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⑧)

【参考⑨】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。

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

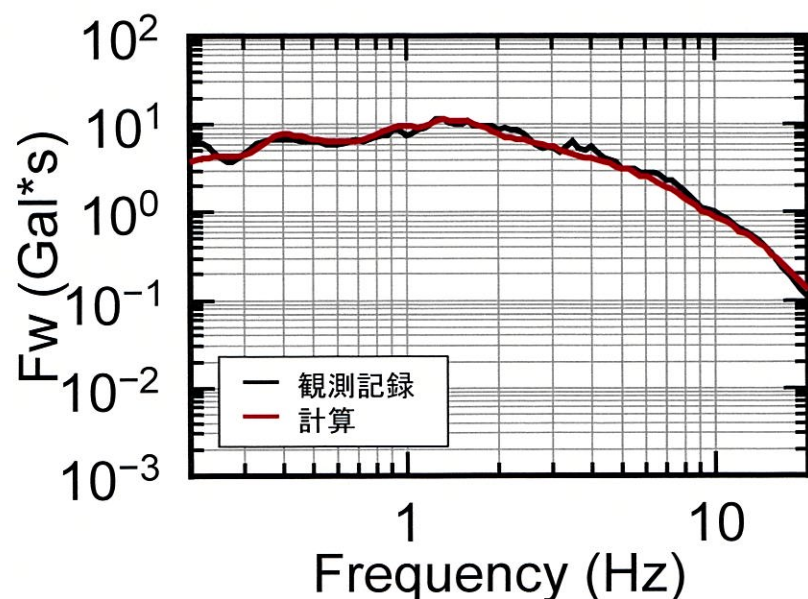
- 地震ごと、観測点ごとに残差 $E_{mn}(f)$ は異なるため、ブロックインバージョン結果を用いた地下構造モデル全体の妥当性確認における地震基盤相当面の地震波の作成では、この残差 $E_{mn}(f)$ の取扱いに留意する必要あり。
- 観測記録のフーリエ振幅スペクトル $O_{mn}(f)$ と計算によるフーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ の残差 $E_{mn}(f)$ は、下記の要因等が考えられる。
 - 震源の破壊伝播効果、放射特性
 - 表面波などのS波部分以外の波形
 - 各特性の推定誤差 など
- 残差 $E_{mn}(f)$ が1.0に近いほど、観測記録 $O_{mn}(f)$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

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

【参考⑨】 ブロックインバージョンにおける残差

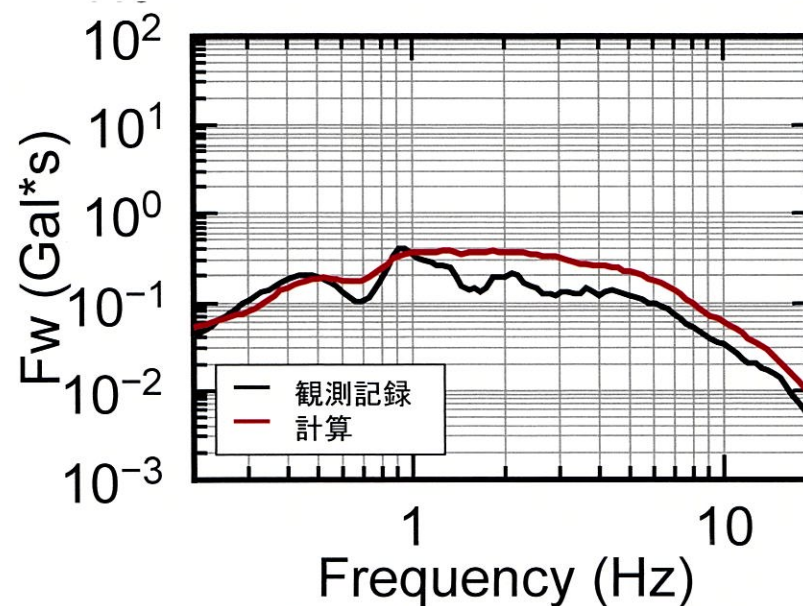
■ 地震ごとの残差について

- 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

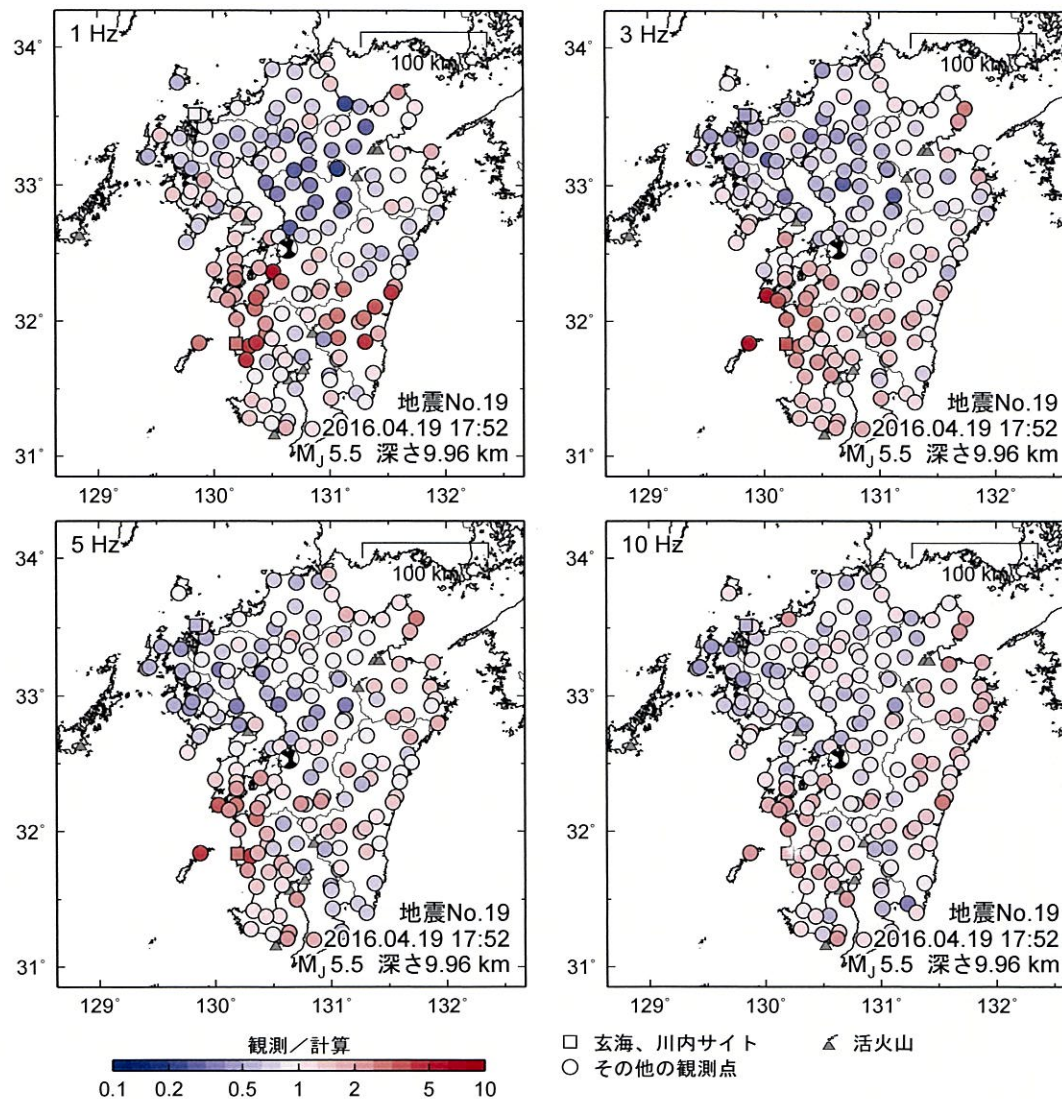
⑱熊本県熊本地方の地震

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⑨】 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。



⑨熊本県熊本地方の地震
残差の空間分布の例

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査以降、継続的に敷地地盤において地震観測を実施。敷地で得られた地震観測記録は76地震から156地震に増加している（301頁）。今回、既許可以降取得した地震観測記録を含めて、以下の①、②についてデータの更新を実施。

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

- ①・②のデータを更新した結果は以下のとおり。

①地震の到来方向による増幅特性の検討（302～305頁）

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

②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比率（306～308頁）

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

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

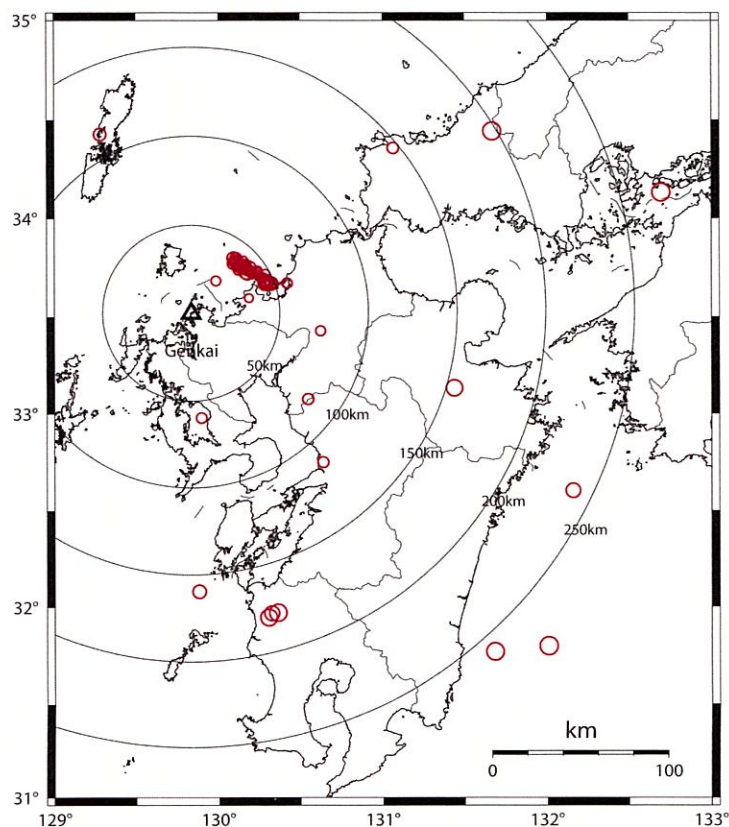
※なお、既許可以降に得られた地震観測記録は地下構造モデルの設定に用いていること、及び既許可と比較して震央距離が同程度からやや近い地震観測記録が増加したことを踏まえ、既許可審査時以降に取得した地震観測記録を①・②において参照する。

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査から敷地で得られた地震観測記録は76地震から156地震に増加。
- 既許可時審査以降に増加した地震観測記録を含め、①地震の到来方向による増幅特性の検討及び②地震観測記録とNoda et al. (2002)による応答スペクトルの比についてデータを更新。

計76地震

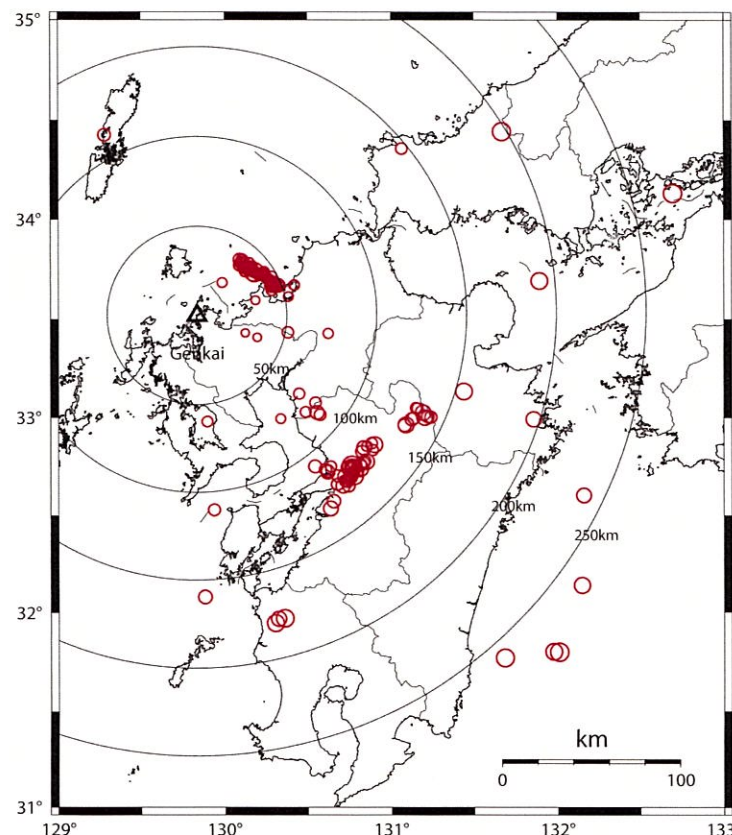
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

計156地震

※2000年鳥取県西部地震等は図の枠外



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

①地震の到来方向による増幅特性について

- 既許可時審査と同様に、敷地で得られた地震観測記録のうちM5.0以上の内陸地殻内地震及び内陸地殻内地震以外の地震を対象に、地震の到来方向による増幅特性について検討を実施。
- 敷地で得られたM5.0以上の地震観測記録は既許可時審査から23地震増加。(下表参照:ハッチ部は既許可審査時の地震)

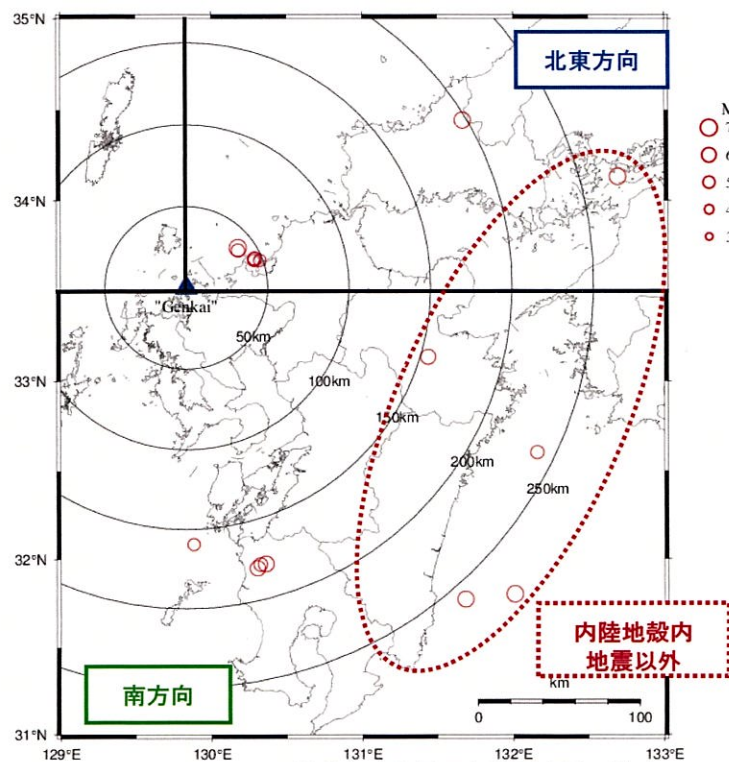
到来方向	地震名	発生日	M	震央距離(km)	深さ(km)
内陸地殻内地震以外	日向灘	1996年10月19日	6.9	279	34.0
	日向灘	1996年12月3日	6.7	260	38.0
	瀬戸内海安芸灘	2001年3月24日	6.7	273	46.5
	日向灘	2006年3月27日	5.5	240	34.8
	大分県西部	2006年6月12日	6.2	155	145.2
	伊予灘	2014年3月14日	6.2	192	78.0
	日向灘	2014年8月29日	6.0	265	18.2
	大分県南部	2015年7月13日	5.7	197	58.0
	日向灘	2019年5月10日	6.3	277	25.0
北東方向	山口県	1997年6月25日	6.6	198	8.3
	鳥取県西部	2000年10月6日	7.3	377	9.0
	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40	9.2
	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39	10.5
	福岡県中部	2005年4月10日	5.0	45	4.7
	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46	13.5
	福岡県中部	2005年4月20日	5.1	45	13.3
	福岡県中部	2005年5月2日	5.0	48	11.4

到来方向	地震名	発生日	M	震央距離(km)	深さ(km)
南方向	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178	11.9
	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178	14.8
	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	180	9.2
	天草灘	2006年2月4日	5.1	159	11.6
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126	8.0
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.0	126	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.1	125	14.0
	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126	7.0
	熊本県熊本地方	2016年4月15日	5.0	125	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121	12.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.3	126	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121	15.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123	11.0
	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132	7.0
	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138	11.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119	16.0
	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123	12.0
	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140	9.0
	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132	10.0
	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.0	130	11.0
	熊本県熊本地方	2016年8月31日	5.2	115	13.0
	熊本県熊本地方	2019年1月3日	5.1	86	10.0

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

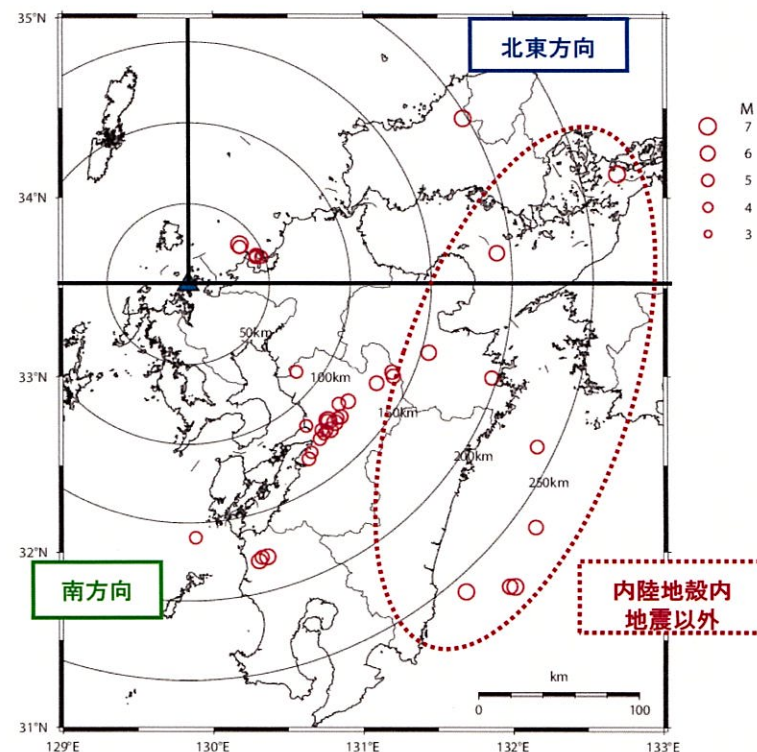
- 既許可時審査以降、計23の地震観測記録が増加している。地震観測記録の内訳は以下の通り。
 - 北東方向の地震観測記録は増加していない。
 - 南方向の地震観測記録は、19地震増加している。（2016年熊本地震前震・本震・余震）
 - 内陸地殻内地震以外の地震観測記録は4地震増加している。

方向	既許可時審査	既許可時審査以降
北東方向	8	8 (0)
南方向	4	23 (+19)
内陸地殻内地震以外	5	9 (+4)



※2000年鳥取県西部地震は図の枠外

敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～既許可時審査)

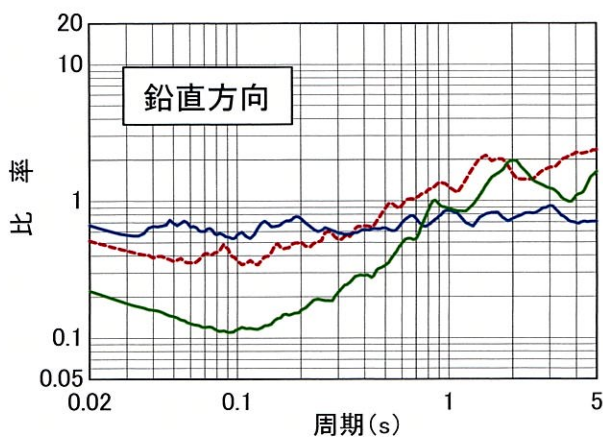
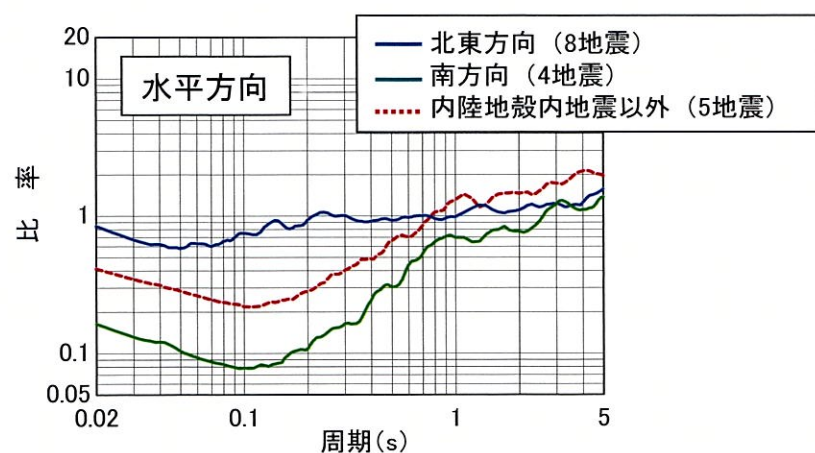


※2000年鳥取県西部地震は図の枠外

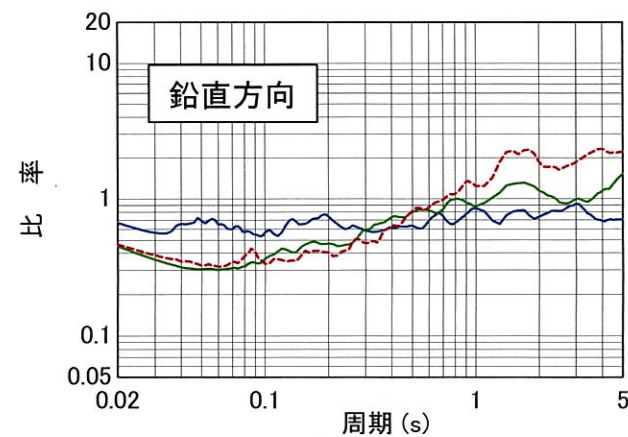
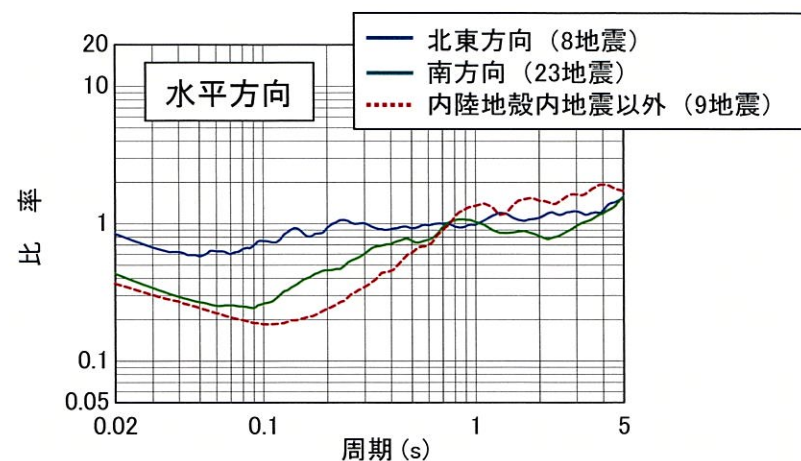
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- 既許可時審査以降に取得した23地震を加えたM5.0以上の地震により、敷地地盤で得られた地震観測記録（EL.11m）と Noda et al. (2002)による応答スペクトルの比を到来方向別に比較・検討した結果、各方向のばらつきはあるが、短周期側で概ね1を下回っており、特異な地盤増幅がないことを確認した。
- ただし、南方向は2016年熊本地震により数が増加し、既許可時審査に比べて短周期側の比率が大きくなる傾向があるため、次頁でこれらの要因を分析する。



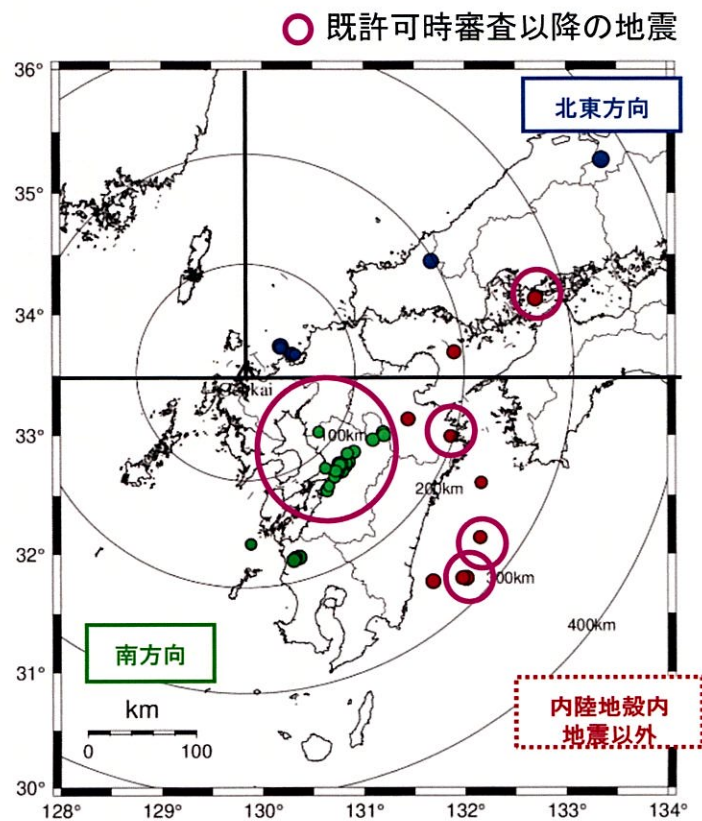
既許可時評価
(観測開始～既許可時審査)



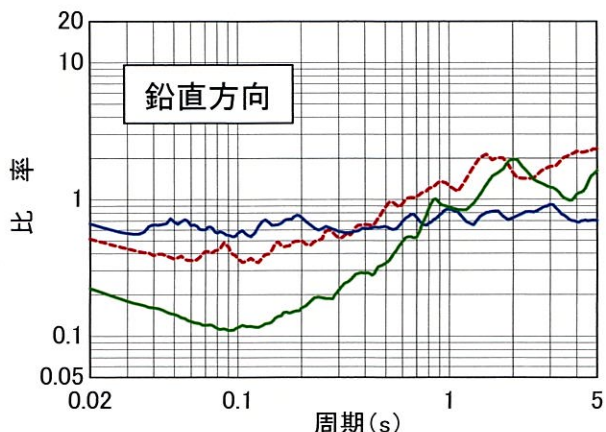
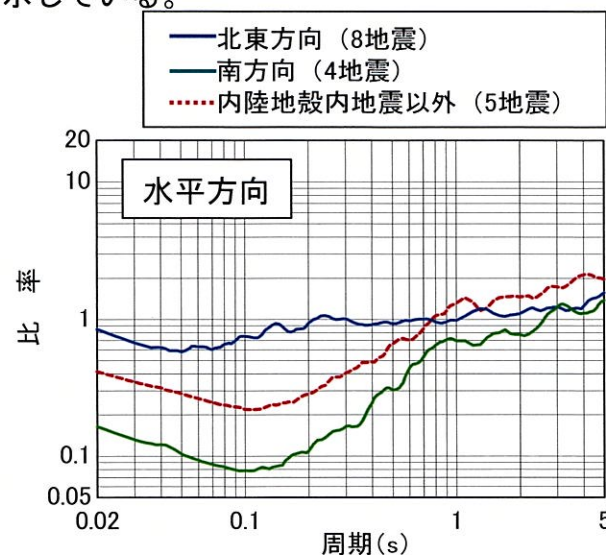
今回評価
(観測開始～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

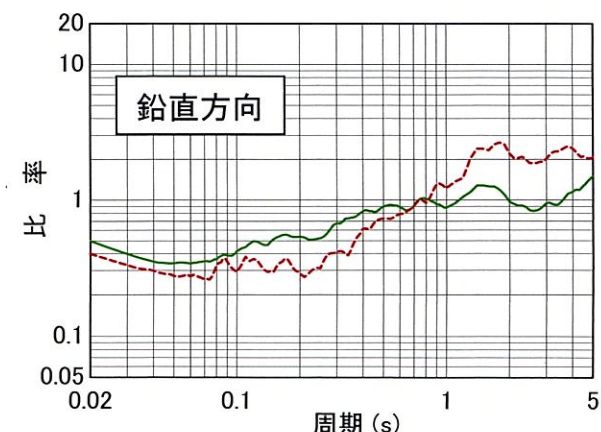
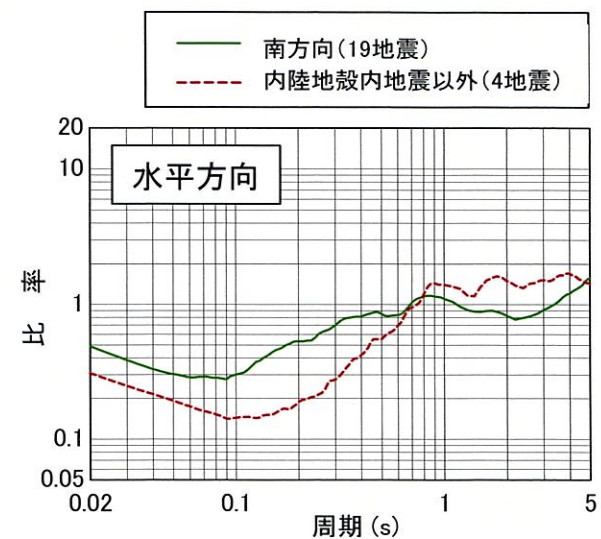
- ここでは、短周期側の比率が大きい傾向が見られた南方向に着目して、既許可時審査時と既許可時審査から2019年度までの比を算出。
- 既許可時審査の南方向では1997年鹿児島県北西部地震の地震群（震央距離180km程度）が主であり、伝播距離の減衰効果により短周期側が小さい比率になっていた。一方、既許可時審査以降の南方向は、2016年熊本地震の地震群（震央距離120～130km程度）が主であり、1997年鹿児島県北西部地震の地震群より震央距離がやや近いため、伝播距離の減衰効果がなく、短周期側の比が大きくなったと考えられる。
- いずれも、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示している。



敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)



既許可時評価
(観測開始～既許可時審査)



今回評価
(既許可時審査～2019年度)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

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

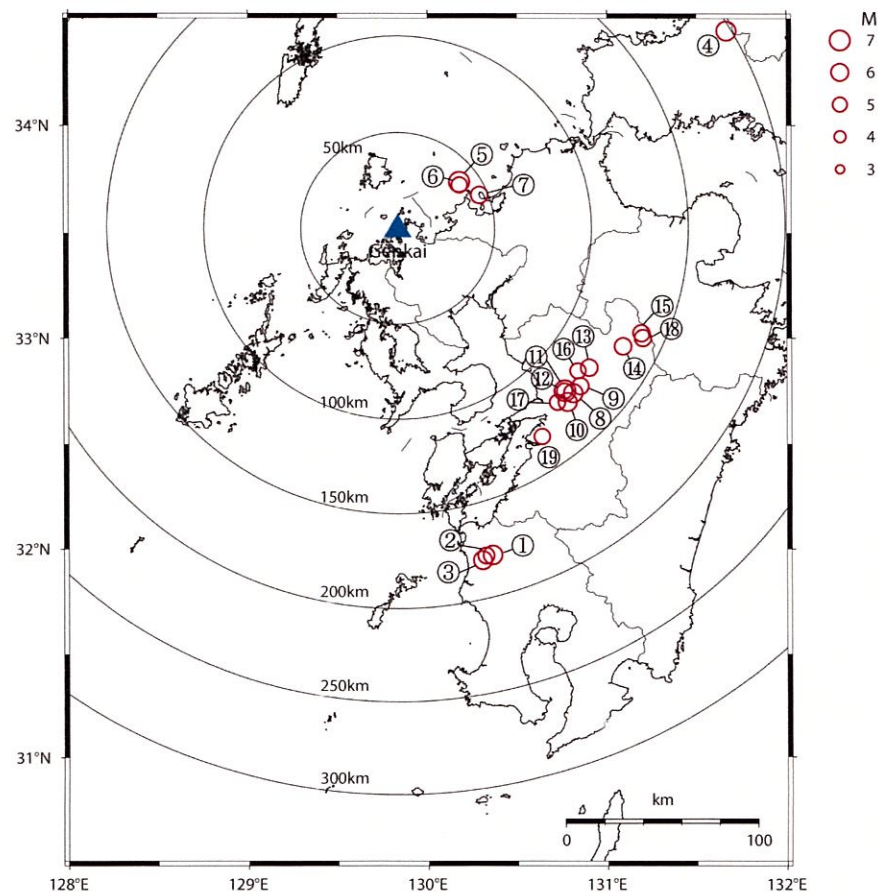
- 既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震*の地震観測記録とNoda et al. (2002) による応答スペクトルとの比を算定。

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

地震諸元 (計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

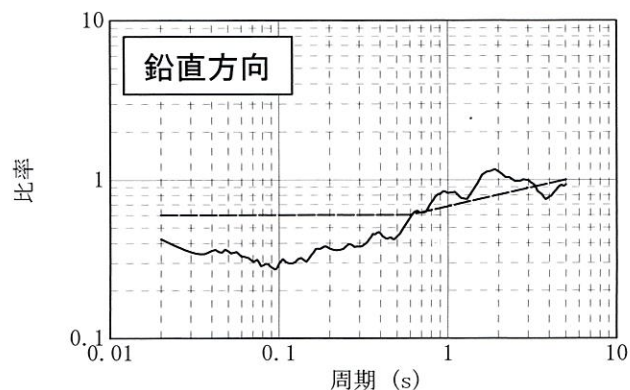
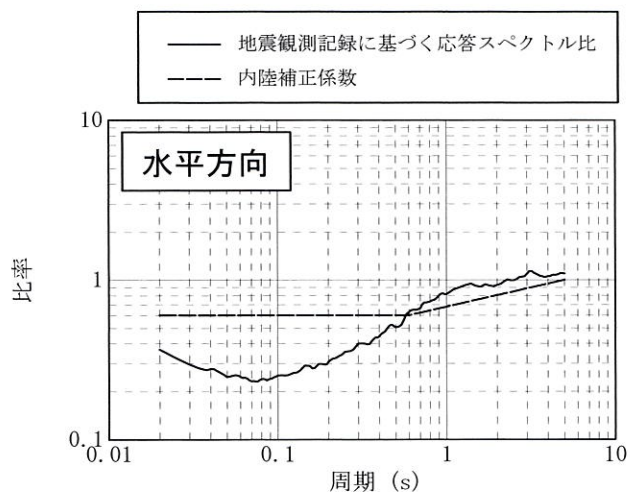
既許可時審査
↑
今回新たに追加



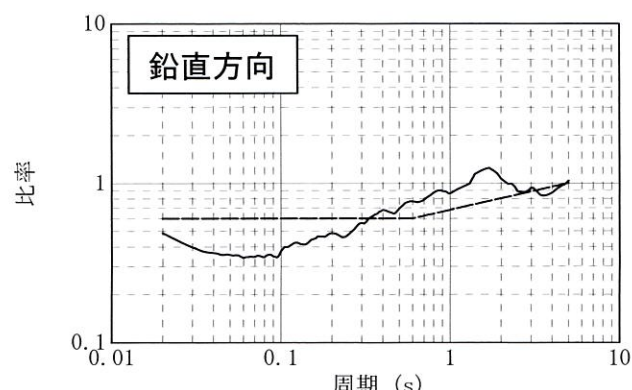
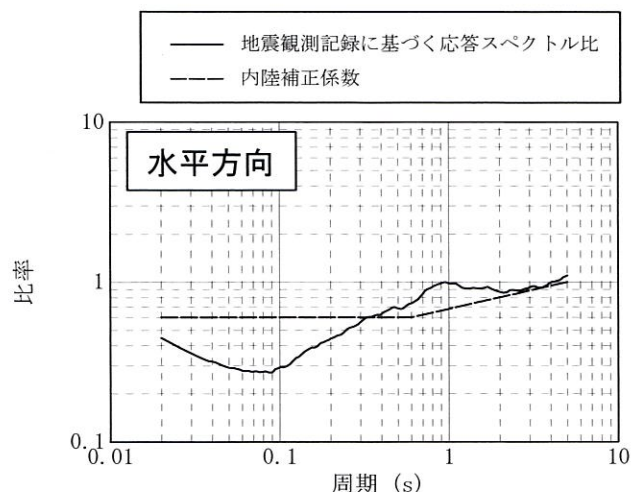
敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度) (計19地震)

【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

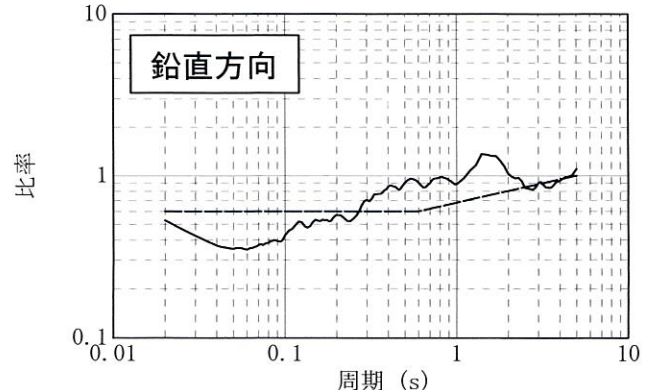
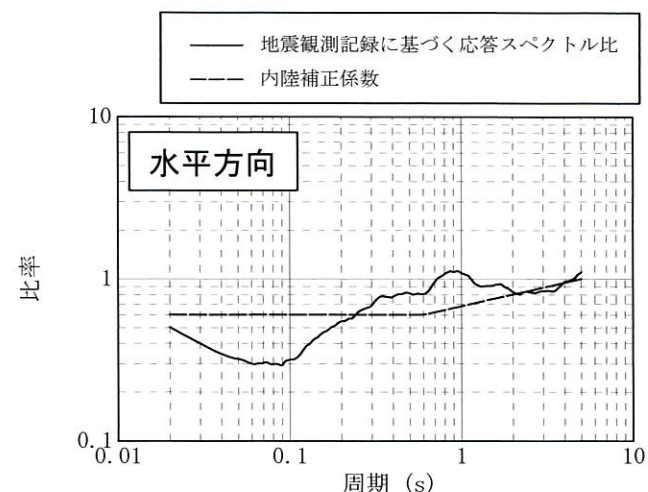
- 既許可時審査までと2019年度までに敷地地盤で得られた内陸地殻内地震の地震観測記録（M5.4以上の地震、震央距離200km程度以内）とNoda et al. (2002)による応答スペクトルとの比を比較・検討した結果、全周期帯で概ね1を下回る傾向であることを確認した。
- なお、既許可時審査に比べて、若干短周期側の比率が大きくなっているが、①で示したとおり、2016年熊本地震の地震群が増加したことによる伝播距離の減衰効果によるものであり、特異な傾向の変化ではない。



既許可時評価
観測開始～既許可時審査(①～⑦)



今回評価
観測開始～2019年度(①～⑱)



(参考)既許可時審査～2019年度(⑧～⑱)

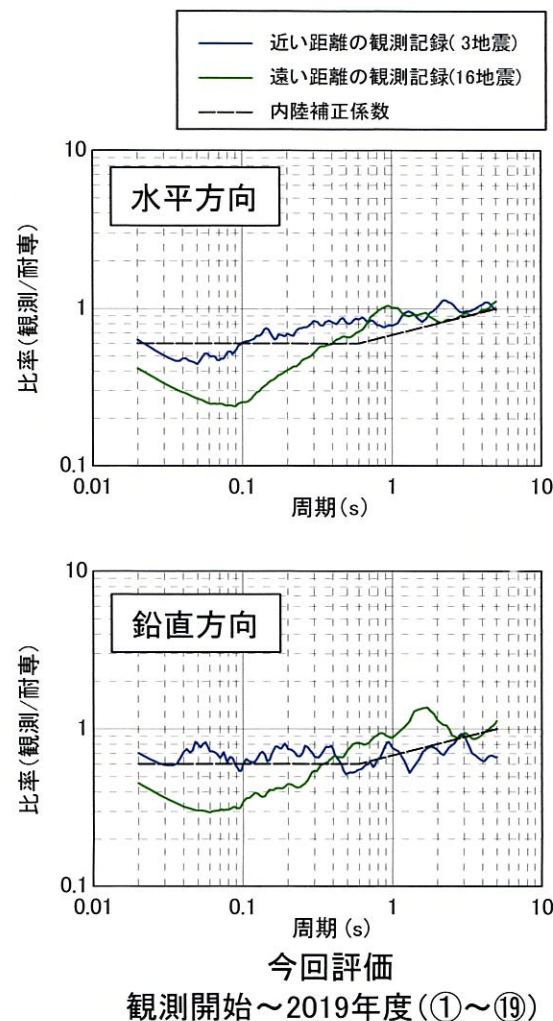
【参考⑩】 既許可時審査以降に取得した地震観測記録の更新について

- ①の検討において、伝播距離が近い場合、短周期側の比率が大きくなる傾向があるため、伝播距離の違いが短周期側の比率に与える影響について検討を実施。伝播距離が近い3地震(⑤⑥⑦)と、遠い16地震(①~④, ⑧~⑱)に分類。
- 検討した結果、伝播距離が近い地震(青線)は、伝播距離が遠い地震(緑線)より短周期側の比率が大きくなる傾向にあるが、地震波の距離減衰特性の一般的な傾向を示しており、概ね1を下回る傾向は変わらないことを確認した。

伝達関数(周波数依存型)による
地盤同定に用いた地震諸元(計19地震)

既許可時審査
↑
今回新たに追加

番号	地震名	発生日	M	震央距離(km)	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⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

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

今 回

- 7.5.6.2 震源を特定せず策定する地震動
(2) 検討対象地震の選定と震源近傍の観測記録の収集
b. 「全国共通に考慮すべき地震動」 (Mw6.5程度未満の地震)
(a) 2004年北海道留萌支庁南部地震

(中略)

□2004年北海道留萌支庁南部地震では、震源近傍のK-NET港町観測点において□佐藤ほか(2013)⁽²⁵⁾による精度の高い地盤情報を参考に地盤モデルを設定し、地盤モデルの不確かさを踏まえて基盤地震動を算定する。

敷地の解放基盤表面のS波速度は、K-NET港町観測点のS波速度の0.938km/sを上回る1.35km/sであることから、敷地の解放基盤波は保守的にK-NET港町観測点の基盤地震動を採用する。この解放基盤波にさらに保守性を考慮した上で地震動を設定する。

(以下略)

①2004年北海道留萌支庁南部地震に関する地盤モデルの不確かさに関する記載 (312頁、313頁)

②敷地の解放基盤波を保守的に設定するため、K-NET港町観測点のS波速度の0.938km/sを上回る1.35km/sの敷地の解放基盤波として、K-NET港町観測点の基盤地震動を採用する旨を記載。(311頁)

③K-NET港町観測点の基盤地震動を採用した解放基盤波に、さらに余裕(10ガル程度)を持たせた地震動を2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動として考慮した旨の記載 (312頁、314頁)

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

2004年北海道留萌支庁南部地震の「震源を特定せず策定する地震動」への反映

第89回審査会合
資料再掲

[検討全体の流れ](電力大での検討)

佐藤ほか(2013)⁷⁾の知見

- ・ ボーリング、PS検層により、深さ-41mまでの地盤モデルを構築
- ・ 室内試験により、非線形性に係るデータも取得
- ・ それらのデータにより、解放基盤波 ($V_s=938$ m/s)を推計 **【P343】**

解放基盤波の妥当性に係るこれまでの整理

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

今後の取り組み

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

現時点における当社としての判断

(当社独自の判断)

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

〈新たな地震動の設定の考え方〉

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

【P344~P352】

- ・ その結果を踏まえ、「震源を特定せず策定する地震動」として設定

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

第89回審査会合
資料再掲

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

【余裕を持たせた地震動を設定するための対象となるパラメータの選定】

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

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

佐藤ほか(2013)⁷⁾における地震動評価モデル

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

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

【余裕を持たせた地震動の設定】

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

①
③

【参考⑪】 2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

第89回審査会合
資料再掲

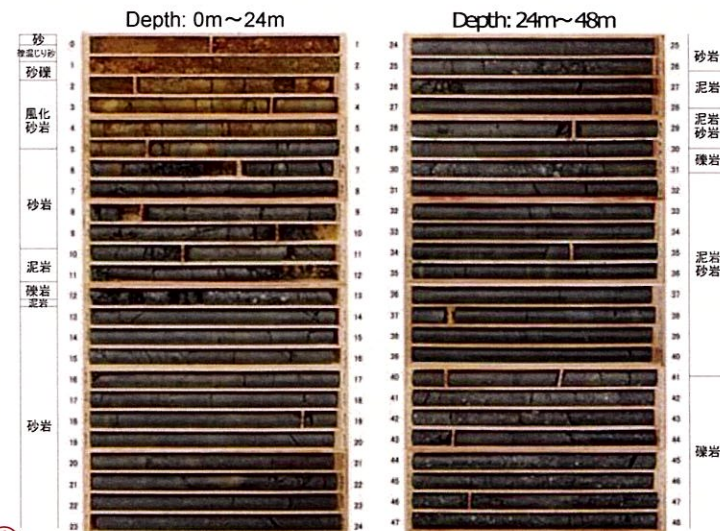
■ 前頁での知見の整理を踏まえ、余裕を持たせた地震動を設定するための減衰の値を以下のとおり判断。

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

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

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

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



①

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

佐藤ほか(2013)⁷⁾における地震動評価モデル

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

【参考⑪】2004年北海道留萌支庁南部地震に関する記載の充実について

■ まとめ資料の再掲（赤四角囲みの部分が記載の充実に該当する箇所）

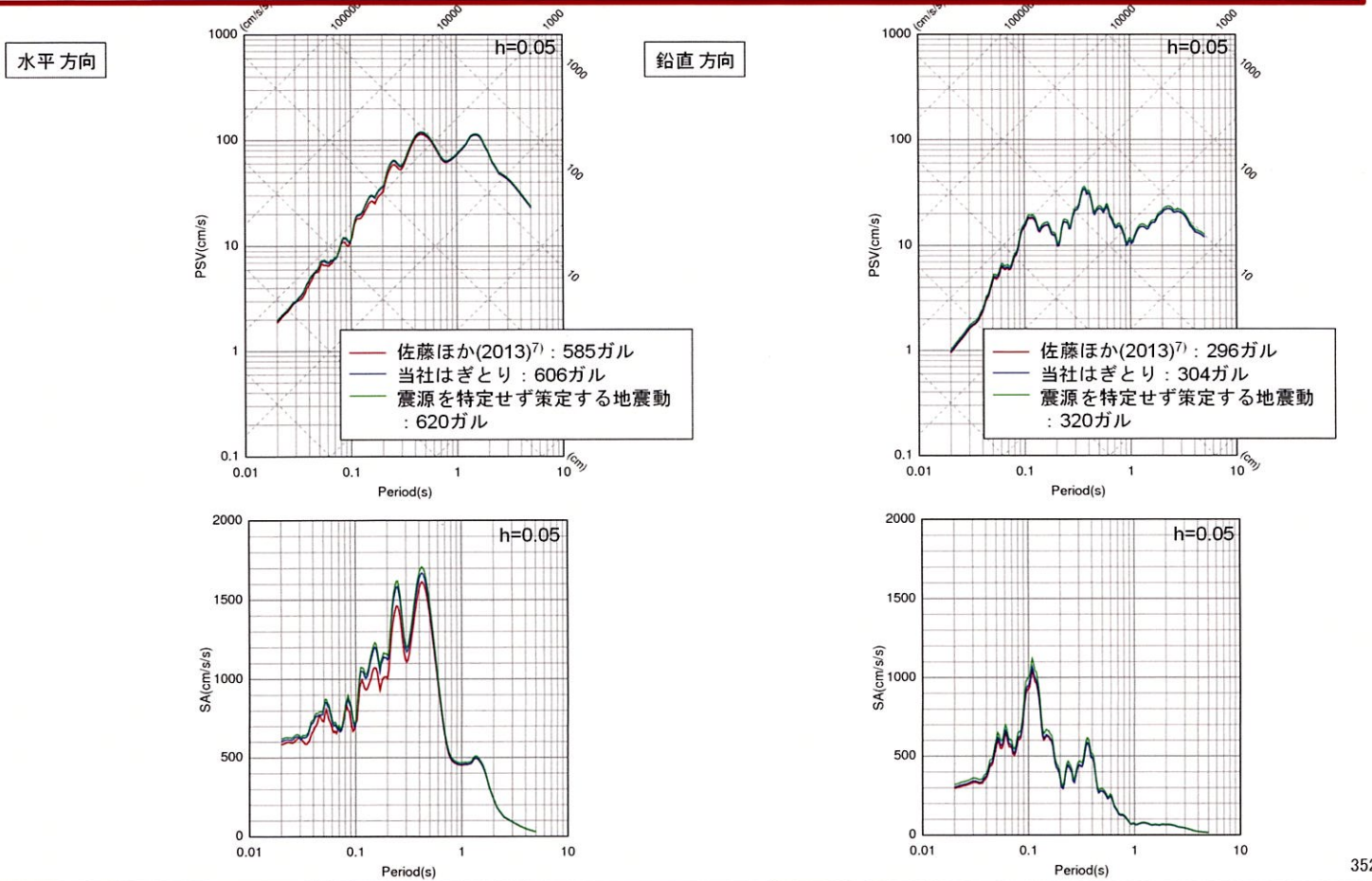
平成28年10月19日 まとめ資料
TC-031改7より抜粋 赤枠を追記

現状の解放基盤波に余裕を持たせた当社独自の新たな地震動の設定

第89回審査会合
資料再掲

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

③



【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

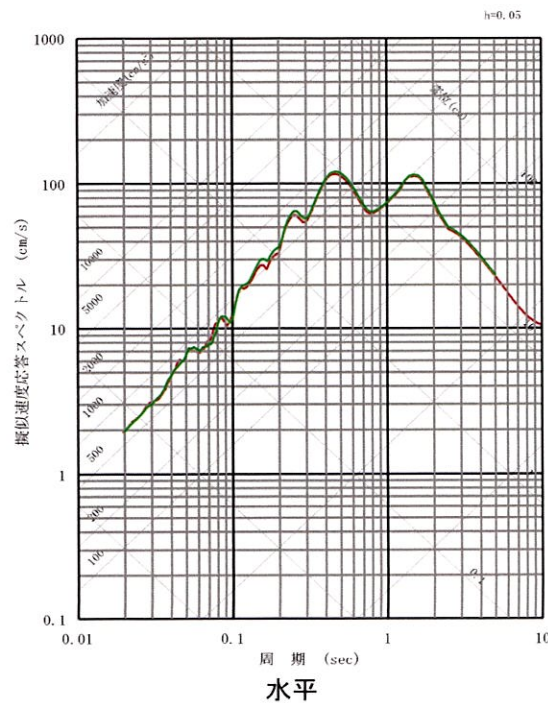
- 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動（以下、「留萌地震動」とする。）の策定にあたり、当社川内及び玄海では、佐藤ほか(2013)の図の“読み取り”により地盤モデルを設定している。
- 他社原子力発電所（硬岩サイト）では、水平動については、佐藤ほか(2013)による数値データに基づき、上下動については、佐藤ほか(2013)以降に再測定したPS検層に基づき、地盤モデルを設定している。
- 上記の通り、設定した地盤モデルはそれぞれ異なるが、当社川内及び玄海と他社原子力発電所の留萌地震動について比較した結果、地震動レベルは概ね同等であることを確認済みである。

5. 震源を特定せず策定する地震動

第122回審査会合
資料再掲

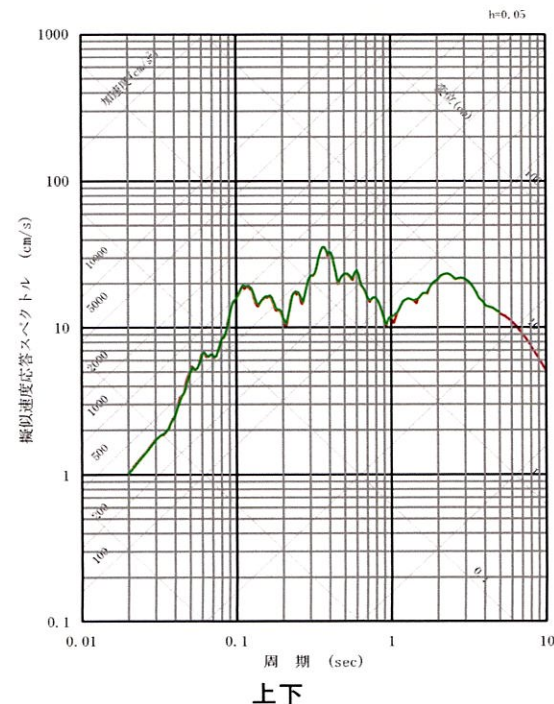
101

■ 2004年北海道留萌支庁南部地震の評価結果



【当社】

2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動



【他社原子力発電所（硬岩サイト）】

2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動

第131回審査会合
資料1-3 高浜発電所
地震動評価について
に加筆

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

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

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

当社川内及び玄海と他社原子力発電所（硬岩サイト）の留萌地震動の策定の違い

	当社（川内・玄海）	他社（硬岩サイト）
水平動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)の非線形特性のうち礫混じり砂の非線形特性について、<u>佐藤ほか(2013)の図の“読み取り”</u>による値を設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（318頁）し、等価線形化法によりはぎとり波（<u>606ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に余裕を考慮して、620ガルの基準地震動を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)の非線形特性のうち礫混じり砂の非線形特性について、<u>佐藤ほか(2013)による数値データに基づき</u>設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（320頁）し、等価線形化法によりはぎとり波（<u>609ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、620ガルの基準地震動を策定
上下動	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)のP波速度、地盤減衰について、佐藤ほか(2013)の図の<u>“読み取り”</u>による値を設定し、EL. -6m以深の地盤減衰を3%に変更（319頁）し、線形解析によりはぎとり波（<u>304ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に余裕を持たせて、320ガルの基準地震動を策定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 佐藤ほか(2013)以降に、<u>再測定を実施したPS検層に基づき地盤モデルを再設定</u>（320頁）し、線形解析によりはぎとり波（<u>306ガル</u>）を算出。 ・ 上記はぎとり波に原子力発電所の耐震性に求められる保守性を勘案して、320ガルの基準地震動を策定

【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

【参考】 当社の留萌地震動に用いた地盤モデル（水平動）

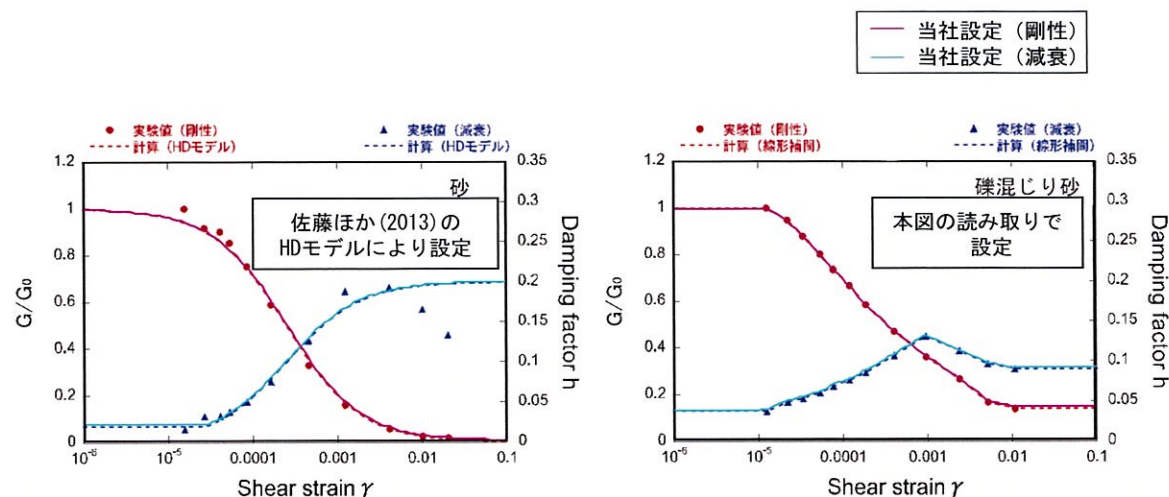
- ・ 礫混じり砂の非線形特性については、佐藤ほか（2013）の図の読み取りで設定（礫混じり砂以外はHD（Hardin-Drnevich）モデルにより設定）
- ・ EL. -6m以深の減衰定数を1%から3%に設定

当社独自に設定した初期モデル

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

 読み取りにより地盤の非線形特性を設定

 減衰定数1%⇒3%に設定



【参考⑫】 2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した基準地震動の確認

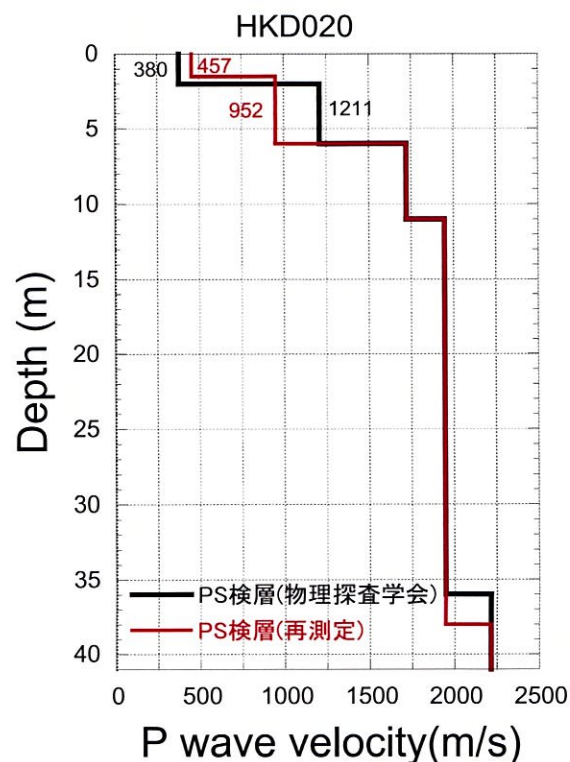
【参考】 他社原子力発電所（硬岩サイト）の留萌地震動に用いた地盤モデル

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

表層の地盤モデル見直しに伴う上下動の再評価

23

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



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

参考文献 (1/2)

- 1) S. Noda, K. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo and T. Watanabe (2002) : RESPONSE SPECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering, Oct. 16-18, pp. 399-408.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2007) : 2005年福岡県西方沖の地震の観測記録に基づく強震動予測手法の検証について (中間報告)
- 3) 防災科学技術研究所 : 地震ハザードステーション J-SHIS、<https://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 4) 武村雅之, 池浦友則, 高橋克也, 石田寛, 大島豊 (1993) : 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第446号, pp. 1-11, 1993年4月.
- 5) 福島美光, 翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp. 37-46, 1994年6月.
- 6) 木下繁夫, 大池美保(2002) : 関東地域の堆積層-基盤系におけるS波の減衰特性 -0.5~16Hz-, 地震第2輯, 第55巻, pp. 19-31.
- 7) R. Fukushima, H. Nakahara, and T. Nishimura(2016) : Estimating S-Wave Attenuation in Sediments by Deconvolution Analysis of KiK-net Borehole Seismograms, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 552-559.
- 8) 佐藤浩章, 金谷守, 大島靖樹 (2006) : 減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案 -岩盤における鉛直アレイ記録への適用と減衰特性の評価-, 日本建築学会構造系論文集, 第604号, pp. 55-62, 2006年6月.
- 9) 佐藤浩章 (2012) : 地震動評価のための地表に近い岩盤における減衰の測定とそのモデル化, 物理探査, 第65巻第1&2号(2012), pp. 37-51.
- 10) R. E. Abercrombie(1998) : A Summary of Attenuation Measurements from Borehole Recordings of Earthquakes: The 10 Hz Transition Problem, Pure appl. geophys., 153 (1998), pp. 475-487.
- 11) Riga, Evi, F. Hollender, A. Roumelioti, P.-Y. Bard, and K. Pitilakis (2019) : Assessing the Applicability of Deconvolution of Borehole Records for Determining Near-Surface Shear-Wave Attenuation, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 109, No.2, pp. 621-635.
- 12) John G. ANDERSON(2004) : QUANTITATIVE MEASURE OF THE GOODNESS-OF-FIT OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS、13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada、Paper No. 243、August 1-6、2004.
- 13) 地盤工学会(2013) : 地盤の弾性波速度検層方法, JGS1122-2013, 2013年3月
- 14) 信岡大, 東宏幸, 大場政章(2012) : PS検層の手法を用いた地盤減衰特性(Q値)の評価, 物理探査, 第6巻, 第1&2号, 79-90, 2012年
- 15) 佐藤浩章, 岡田哲実(2012) : 地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その5) -実岩盤における減衰付加効果の解明のための岩石コアの減衰測定-, 電力中央研究所報告, N11063, 2012年5月

参考文献 (2/2)

- 16) M. N. Toksöz, D. H. Johnston, and A. Timur(1979), Attenuation of seismic waves in dry and saturated rocks: I. Laboratory measurements, *Geophysics*, 44, 4, pp. 681-690
- 17) 日本電気協会(2015):原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2015,一般社団法人日本電気協会
- 18) 武村雅之(1990):日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, *地震* 第2輯, 第43巻.
- 19) H. Kanamori(1977): The Energy Release in Great Earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, No. 20, 2981-2987.
- 20) 萩原尊禮編(1991):日本列島の地震 地震工学と地震地体構造、鹿島出版会.
- 21) 垣見俊弘、松田時彦、相田勇、衣笠善博(2003):日本列島と周辺海域の地震地体構造区分、*地震*、第2輯、第55巻、第4号、pp. 389-406.
- 22) 石田寛, 太田外気晴, 原昭夫, 高橋克也(1987):室内試験、S波検層および観測地震動に基づく地盤の減衰評価, 第15回地盤震動シンポジウム, 1987年8月
- 23) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明(2010):PS検層と鉛直アレー観測記録から評価される地盤の減衰定数の関係性, 物理探査学会第122回学術講演会論文集(2010), 37-40, 2010年
- 24) 小林源裕, 儘田豊, 堤英明, 安藤誠, 鈴木晴彦, 松山尚典(2013):PS検層による地盤のS波の減衰定数の評価に関する検討ー鉛直アレー観測による減衰定数との比較ー, *物理探査*, 第66巻, 第3号, 153-165, 2013年
- 25) 佐藤浩章(2010):地震観測記録に基づく地震動の減衰特性(その4)ー地表に近い岩盤における減衰定数の評価と速度の揺らぎとの関係ー, *電力中央研究所報告*, N10004, 2010年8月
- 26) 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.
- 27) 友澤裕介, 加藤研一, 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎(2019a):九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定(その1)ブロックインバージョン解析に基づく不均質減衰構造の推定, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 21238, 2019年9月.
- 28) 中尾隆, 本村一成, 赤司二郎, 友澤裕介, 加藤研一(2019a):九州地方の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の推定(その2)距離減衰特性の方位性、サイト増幅特性、震源特性, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 21239, 2019年9月.
- 29) 友澤裕介、加藤研一、野尻揮一郎(2019b):地震動の伝播経路特性の領域分割に着目した不均質減衰構造・震源特性・サイト増幅特性の推定 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域を対象とした検討、*日本建築学会構造系論文集*、第84巻、第756号、171-181、2019年2月.
- 30) 笠松健太郎、池浦友則、岡崎敦(2014):KiK-net地点における応答スペクトルのはぎとり倍率、*日本建築学会大会学術講演梗概集*、21207、2014年9月.