

玄海原子力発電所3号炉、4号炉審査資料

資料番号

TTG-004

提出年月日

2021年11月1日

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

2021年11月1日
九州電力株式会社

余 白

1. 地下構造モデルの設定
2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

【参考】友澤ほか(2019a)の概要

1. 地下構造モデルの設定

- 既許可（平成29年1月18日許可）では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、解放基盤表面以深の地下構造モデルを設定。
- 上記地下構造モデルは、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」における「ハイブリッド合成法」（短周期帯：経験的グリーン関数法、長周期帯：理論的方法）のうち長周期帯の理論的方法による評価に採用。

・長周期帯における理論的手法による評価に用いる解放基盤表面以深の地下構造モデルについては、地質調査結果及び既往の文献により、一次元地下構造モデルを構築した。

玄海原子力発電所 一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Q値	備考
解放基盤表面 -15m	1	0.0	2.35	3.00	1.35	100	試掘坑内 弾性波試験
-50m	2	-0.035	2.35	3.44	1.57	100	PS検層
-100m	3	-0.085	2.35	3.47	1.73	100	
-150m	4	-0.135	2.35	3.65	1.77	100	
-200m	5	-0.185	2.40	4.00	2.10	200	地震調査委員会 (2007a) ⁸⁾
地震基盤 -1804m	6	-1.789	2.60	5.50	3.10	300	
-3015m	7	-3.0	2.70	5.90	3.50	300	地震調査委員会 (2003) ⁹⁾
-20015m	8	-20.0	3.00	6.60	3.80	500	
-33015m	9	-33.0	3.30	7.60	4.30	500	

第402回
審査会合資料

※Q値は慣用値(Vs/15~10)を基に設定

1. 地下構造モデルの設定

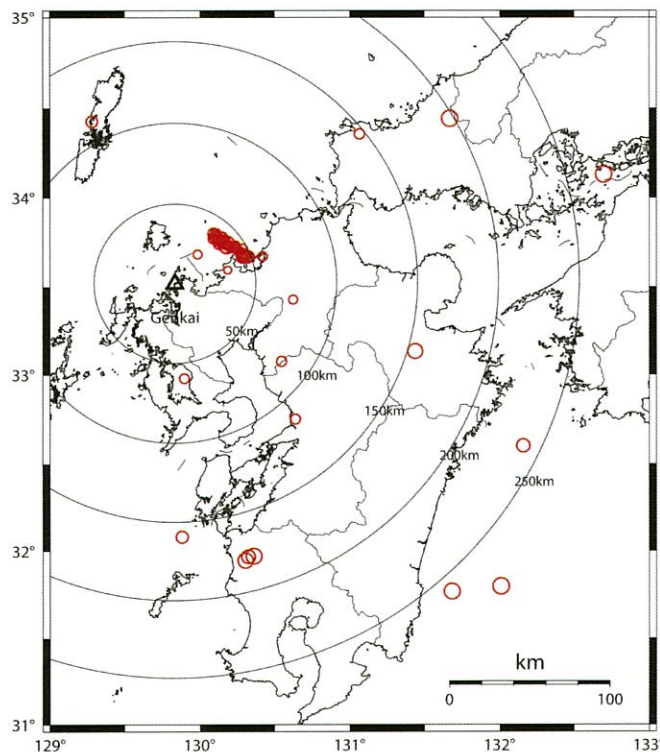
- 既許可（平成29年1月18日許可）以降、更なる安全性・信頼性の向上を目的に、継続的に敷地地盤における地震観測を実施するとともに、最新の技術的知見やデータの取得に努めてきた。
- これらの既許可以降に取得した地震観測記録や最新の技術的知見等も含めた多面的な検討により、地下構造モデルを精緻化。
- なお、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価では、短周期側も対象とした地盤減衰の設定が必要。
- 次頁以降で以下の検討及び検証を行い、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを設定。
 - ① 敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び検証（EL. 11.0m～EL. -90.0m）
 - ・ 伝達関数による検討
 - ・ 地震波干渉法による検討
 - ・ 伝達関数による検証
 - ・ 応答スペクトルによる検証
 - ② 精緻化範囲の設定及び検証（EL. -90.0m以深）
 - ・ 原子炉設置位置付近の速度層断面による設定
 - ・ 地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

1. 地下構造モデルの設定

- ①敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び検証 (EL. 11.0m~EL. -90.0m)
- 既許可時審査以降、玄海原子力発電所の敷地地盤における鉛直アレイによる地震観測を継続して実施しており、新たに、2016年熊本地震を含む80地震の観測記録を取得。
(計156地震の観測記録)
- これらの地震観測記録を用いて、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの地盤減衰の検討を実施。

計76地震

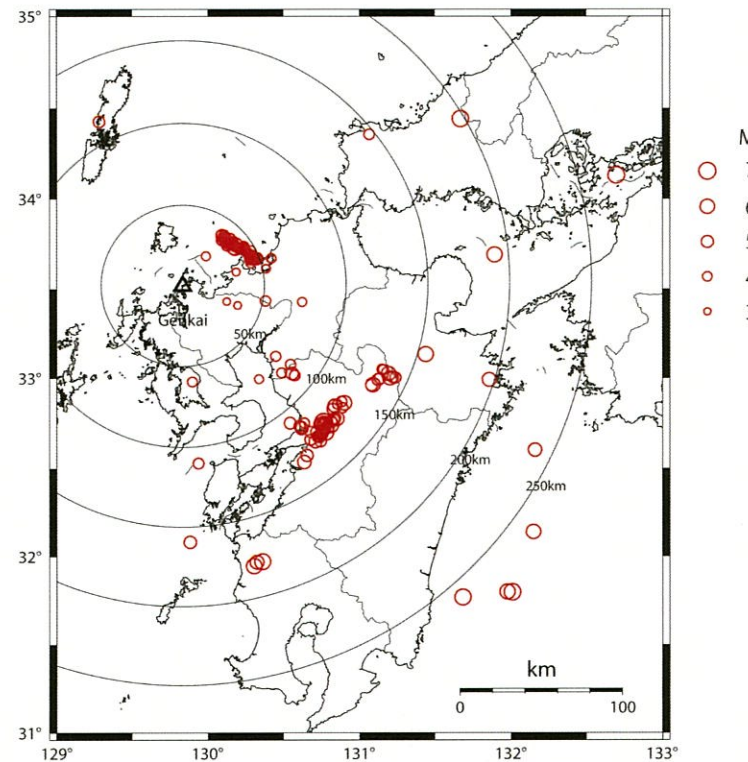
※2000年鳥取県西部地震は図の枠外



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)

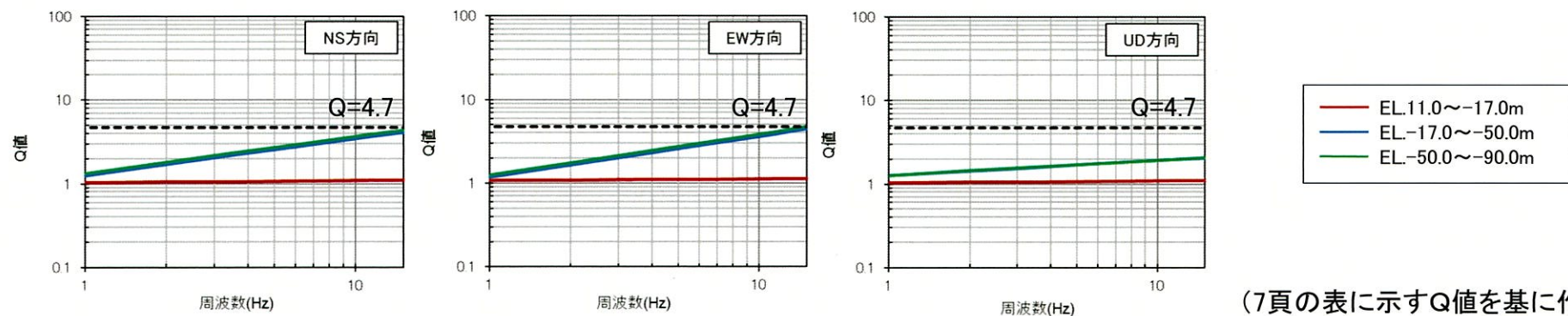
+80地震

1. 地下構造モデルの設定

伝達関数による検討

- 既許可時審査において、敷地地盤で観測された主な7地震※の観測記録の伝達関数に対して、地盤同定を実施（7、8頁参照）。
- 既許可時審査において、同定された地盤減衰（Q値）の下限は $Q=4.7$ 程度。

※ Noda et al. (2002)¹⁾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



(7頁の表に示すQ値を基に作図)

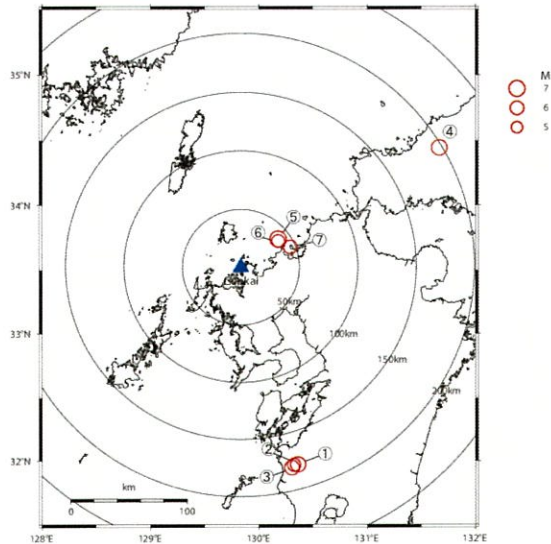
伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)

1. 地下構造モデルの設定

第36回
審査会合資料
(一部修正)

地震観測記録を用いた地盤同定による浅部地下構造の同定

- ・敷地で観測された地震観測記録を用いた逆解析により、EL. -90mまでの浅部地下構造を同定し、地震動評価に用いる地下構造モデルの検証を行う。
- ・同定手法は遺伝的アルゴリズムを用い、各地震計観測点間の伝達関数を目的関数とする。
- ・検討対象地震は、敷地で観測された主な7地震を対象とする。



検討対象地震

番号	地震名	発生日	M	深さ (km)	震央距離 (km)	備考
①	鹿児島県北西部地震	1997年3月26日	6.6	11.85	178	本震
②	鹿児島県北西部地震	1997年4月3日	5.7	14.79	178	
③	鹿児島県北西部地震	1997年5月13日	6.4	9.24	179	本震
④	山口県北部の地震	1997年6月25日	6.6	8.29	198	
⑤	福岡県西方沖地震	2005年3月20日	7.0	9.24	40	本震
⑥	福岡県西方沖地震	2005年3月22日	5.4	10.53	39	
⑦	福岡県西方沖地震	2005年4月20日	5.8	13.50	46	

【地下構造モデル同定結果】

NS方向

層	層上面 EL. (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	減衰	
				Q ₀	α
1	11.0	2.35	1.35	1.04	0.02
2	-17.0	2.35	1.38	1.25	0.44
3	-50.0	2.35	1.59	1.33	0.44
4	-90.0	2.35	1.57	10	0.00

EW方向

層	層上面 EL. (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	減衰	
				Q ₀	α
1	11.0	2.35	1.35	1.08	0.02
2	-17.0	2.35	1.37	1.18	0.49
3	-50.0	2.35	1.58	1.26	0.49
4	-90.0	2.35	1.57	10	0.00

UD方向

層	層上面 EL. (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (km/s)	減衰	
				Q ₀	α
1	11.0	2.35	3.00	1.08	0.00
2	-17.0	2.35	3.03	1.25	0.18
3	-50.0	2.35	3.45	1.27	0.18
4	-90.0	2.35	3.44	10	0.00

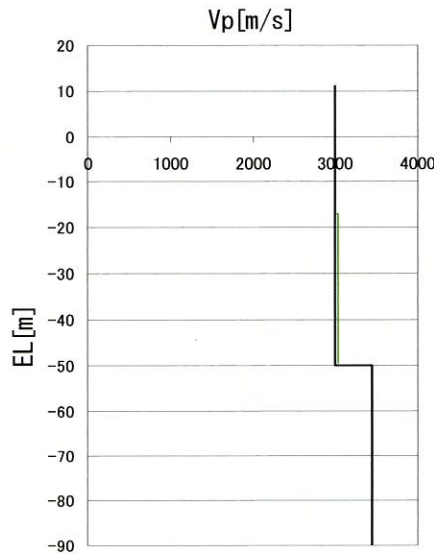
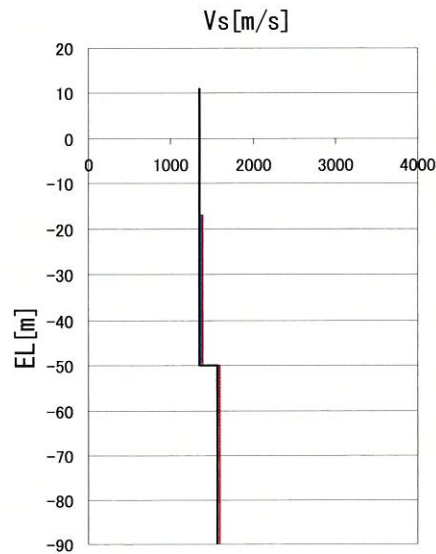
※ $Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$

1. 地下構造モデルの設定

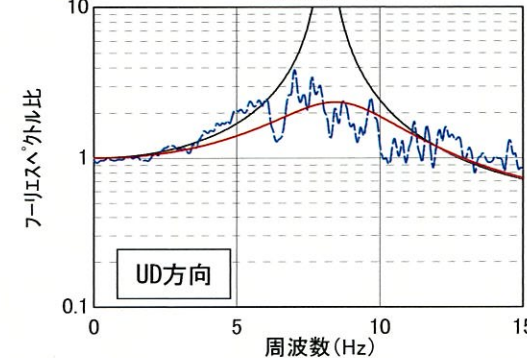
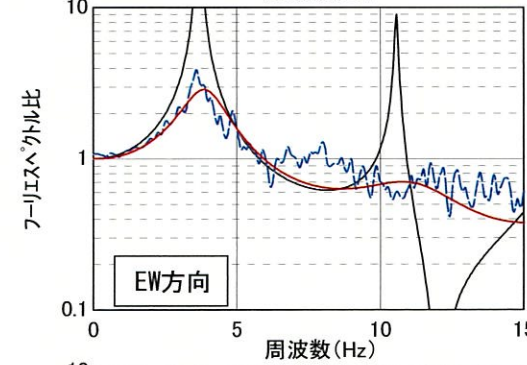
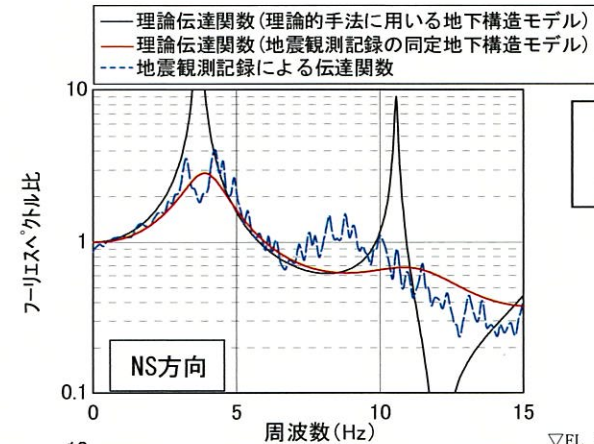
- ・ 主な7地震の地震観測記録を用いて同定された地盤の速度構造から算出される伝達関数は、地震観測記録の伝達関数と整合する。
- ・ 同定された地盤の速度構造は、基準地震動策定において、長周期側の理論的手法による地震動評価に用いる地下構造モデルの速度構造と整合することを確認した。

— : 理論的手法に用いる地下構造モデル
 — : 地震観測記録により同定された地下構造モデル(NS方向)
 — : 地震観測記録により同定された地下構造モデル(EW方向)

— : 理論的手法に用いる地下構造モデル
 — : 地震観測記録により同定された地下構造モデル(UD方向)

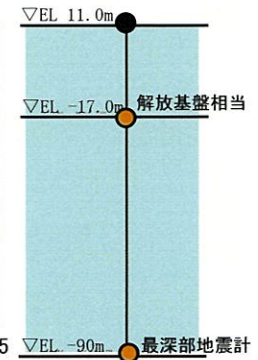


速度構造の比較



伝達関数 (EL. -17m/EL. -90m) の比較

第402回
審査会合資料

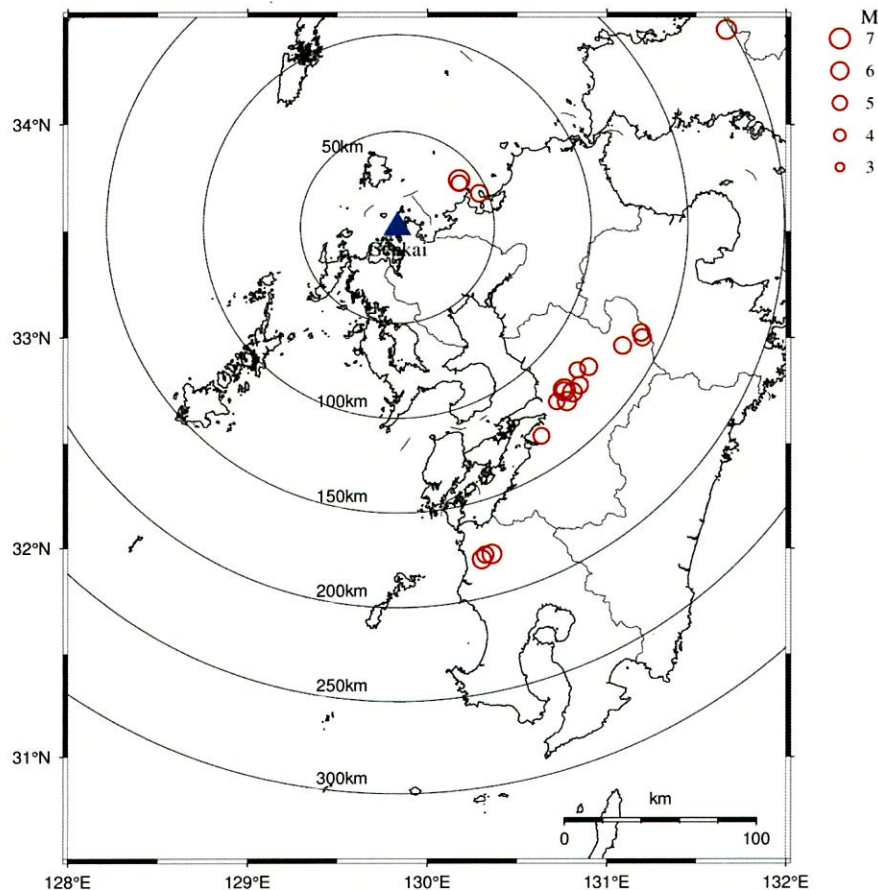


地震計設置位置

1. 地下構造モデルの設定

○ 既許可時審査と同様の観点※で、既許可時審査以降に取得した地震観測記録を加えた計19地震の観測記録の伝達関数に対して、地盤減衰の同定を実施。

※ Noda et al. (2002)¹⁾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



伝達関数による地盤減衰の同定に用いた地震の震央位置 (計19地震)

伝達関数による地盤減衰の同定に用いた地震諸元 (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

1. 地下構造モデルの設定

伝達関数による地盤減衰の同定における解析条件

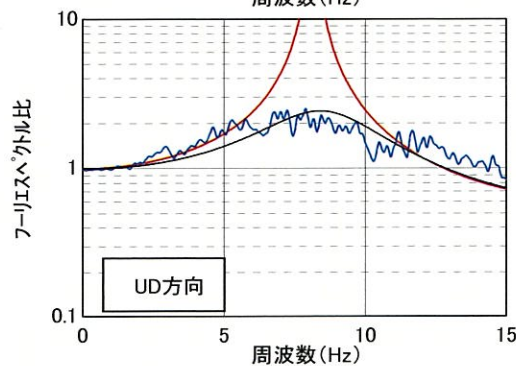
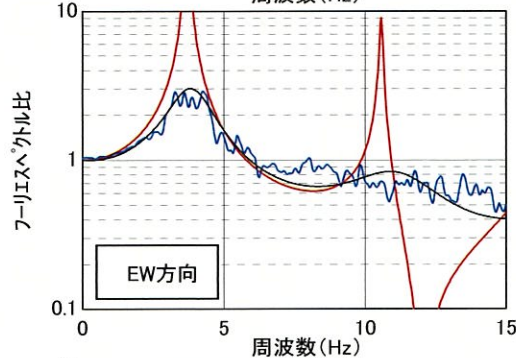
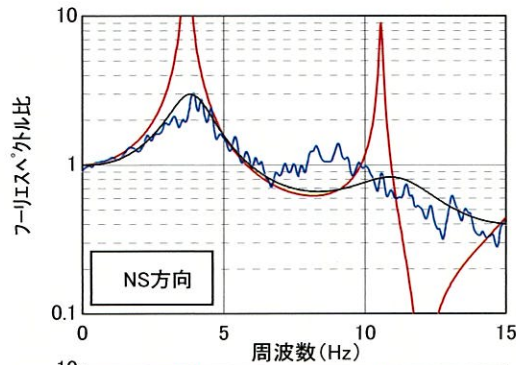
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	19地震
ターゲットとする観測伝達関数	19地震の平均伝達関数(NS, EW, UD成分) P波・S波を含む40秒間を抽出 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰(Q値)を同定
Q値	$Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha$

1. 地下構造モデルの設定

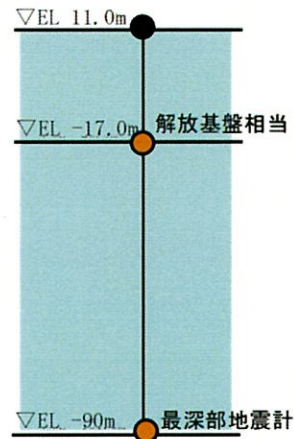
- 地震観測記録 (19地震) による平均伝達関数
- 理論伝達関数 (今回同定結果)
- 理論伝達関数 (既許可地下構造モデル)

○ 層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰 (Q値) を同定。

○ 同定された地盤減衰 (Q値) の下限はQ=6.3程度。



今回の伝達関数の比較
(EL.-17m/EL.-90m)



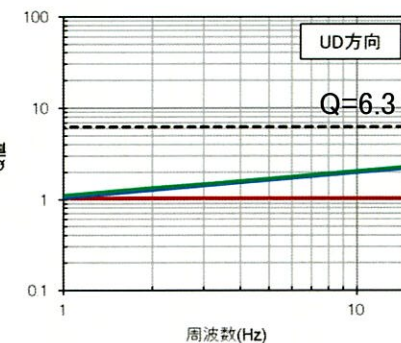
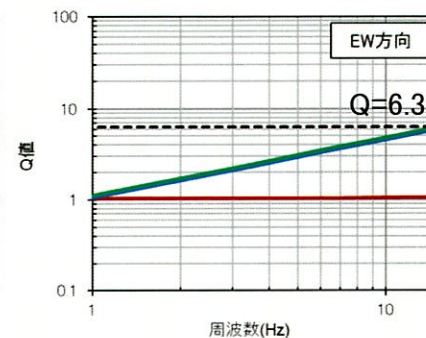
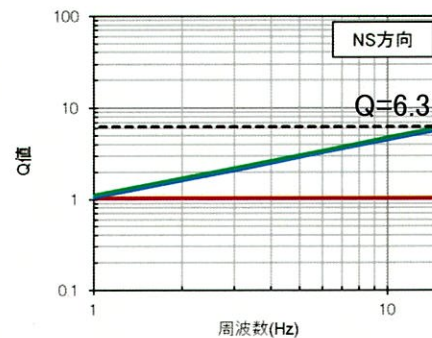
地震計設置位置

地下構造モデル (既許可)

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
11m	0	2.35	1350	3000
-15m	1	2.35	1350	3000
-50m	2	2.35	1570	3440

※解放基盤表面 (EL. -15m) 上に0層を追加

- EL.11.0~-17.0m
- EL.-17.0~-50.0m
- EL.-50.0~-90.0m

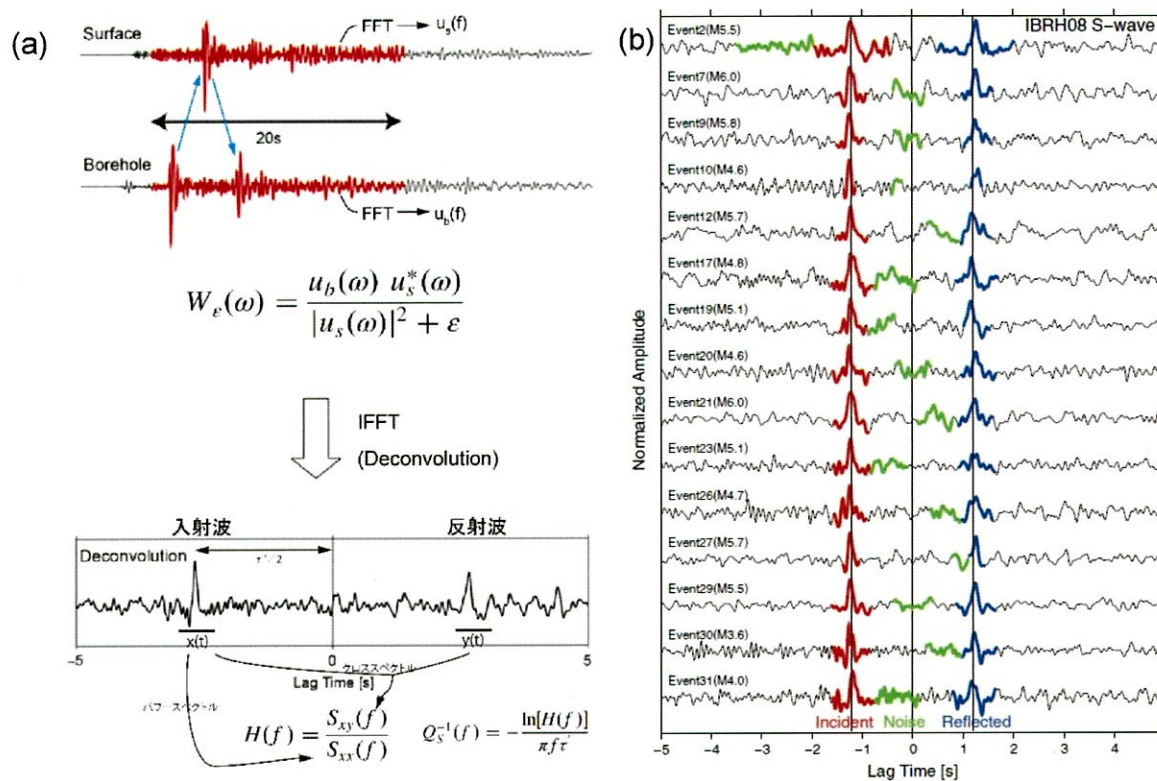


伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)

1. 地下構造モデルの設定

地震波干渉法による検討

- 既許可時審査以降の最新の技術的知見として、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から直接地盤減衰（Q値）を推定可能な地震波干渉法^{2),3)}を用いた検討を実施。
- 地中の地震観測記録には、鉛直下方から入射された波動が地表で反射し、反射波が記録されるため、地表の観測記録に対して地中記録をデコンボリューションすると、入射波と反射波が分離。
- この入射波に対する反射波の振幅の比率に基づき、地盤減衰（Q値）を推定。



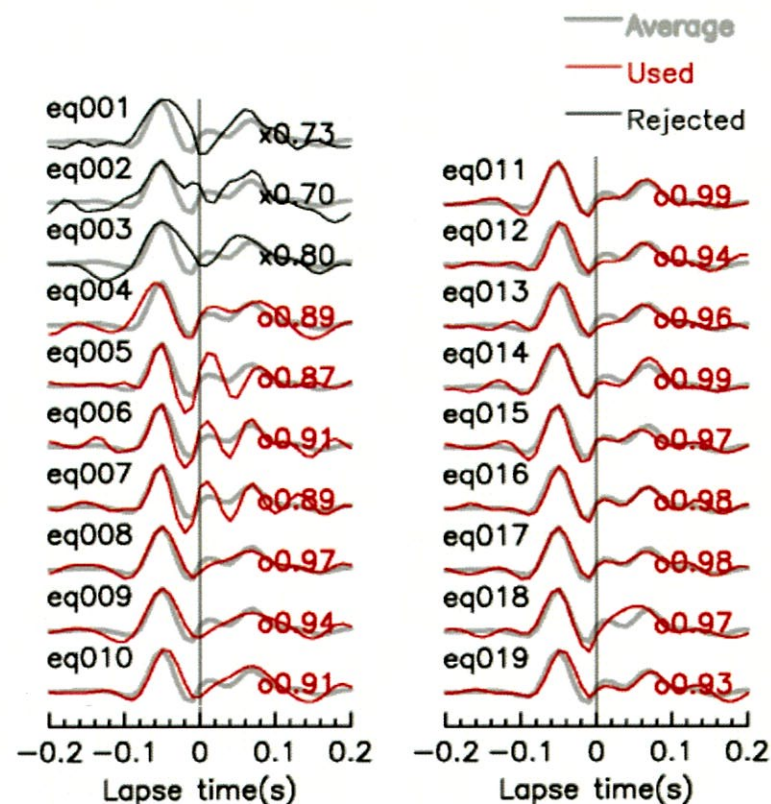
Fukushima et al.(2016)
(一部加筆)

1. 地下構造モデルの設定

- 地震波干渉法による地盤減衰の推定は、伝達関数による地盤減衰の同定に用いた計19地震の観測記録を対象として実施。
- 地盤減衰の推定にあたっては、Anderson (2004)⁴⁾による指標を基に、全地震の波形の平均と各地震の波形の相関がよいものを抽出。

地震波干渉法による地盤減衰の推定に用いた地震諸元
(計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



全地震の波形の平均と各地震の波形の相関

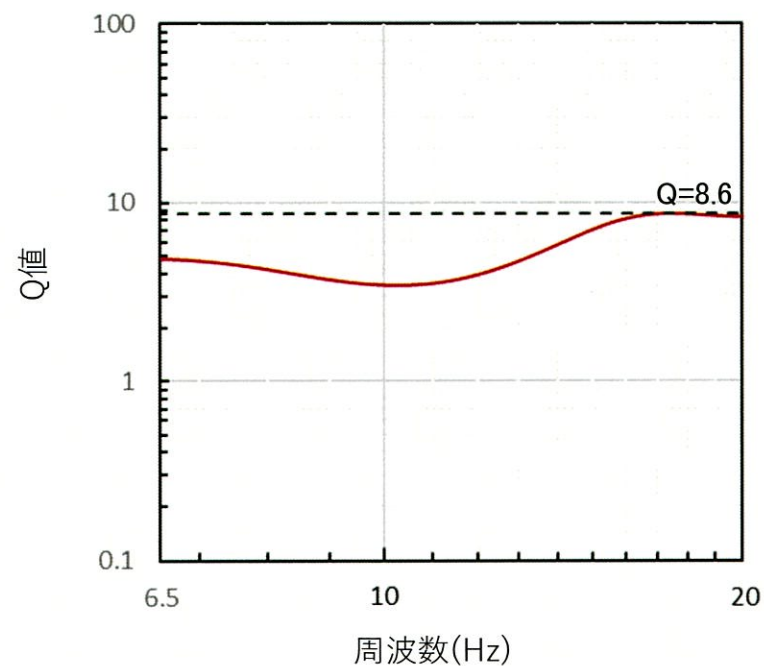
1. 地下構造モデルの設定

地震波干渉法による地盤減衰の推定における解析条件

項目		条件
デコンボリューション	対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
	対象地震数	19地震
	解析成分	Transverse成分
	解析区間	S波を含む20秒
	テーパー	コサインテーパー(両端に1秒)
Q値推定	対象地震の選定条件	デコンボリューションの平均と相関($\rho \geq 0.8$)が高い地震
	解析区間	ピーク時間 $\times 2$
	スムージング	対数型Parzenウィンドウ Band幅は中心周波数 f に対して $f/1.3 \sim 1.3*f$

1. 地下構造モデルの設定

- 地震波干渉法により推定された地盤減衰 (Q値) の下限は $Q=8.6$ 程度。

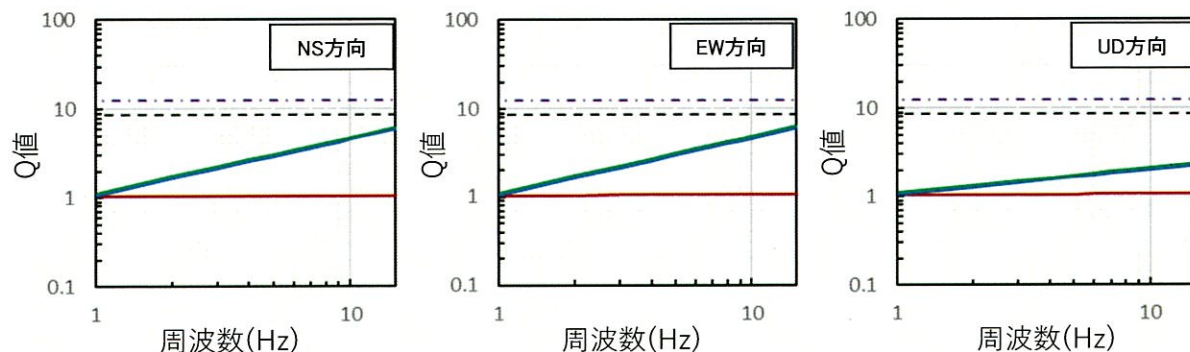
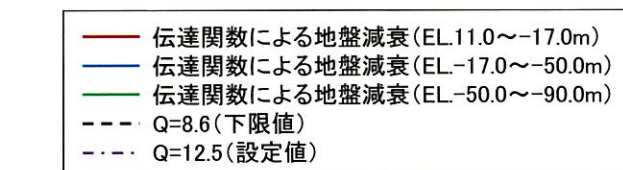


地震波干渉法により推定された地盤減衰
(EL.11m~EL.-90m)

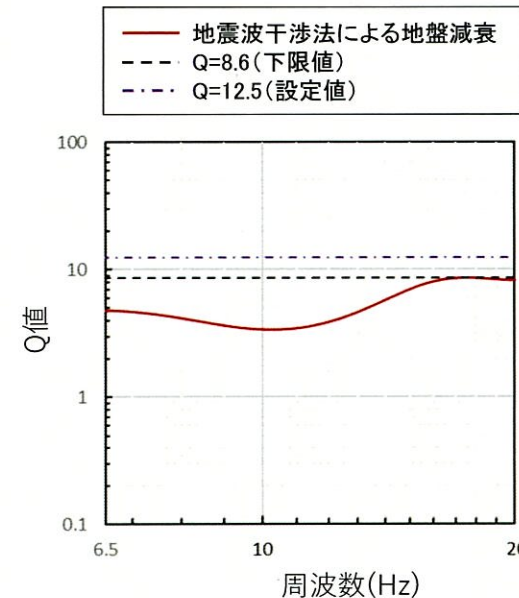
1. 地下構造モデルの設定

地盤減衰 (Q値) の設定 (EL. 11.0m~EL. -90.0m)

- 敷地地盤の鉛直アレイ地震観測記録に基づく伝達関数による地盤減衰の同定結果及び地震波干渉法による地盤減衰の推定結果によると、地盤減衰 (Q値) の下限は $Q=8.6$ 程度。
- 上記の結果を踏まえ、地盤減衰の不確かさを考慮し、保守的に鉛直アレイ地震観測記録に基づく地盤減衰を周波数によらず一律で $Q=12.5$ と設定。



伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)



地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)

1. 地下構造モデルの設定

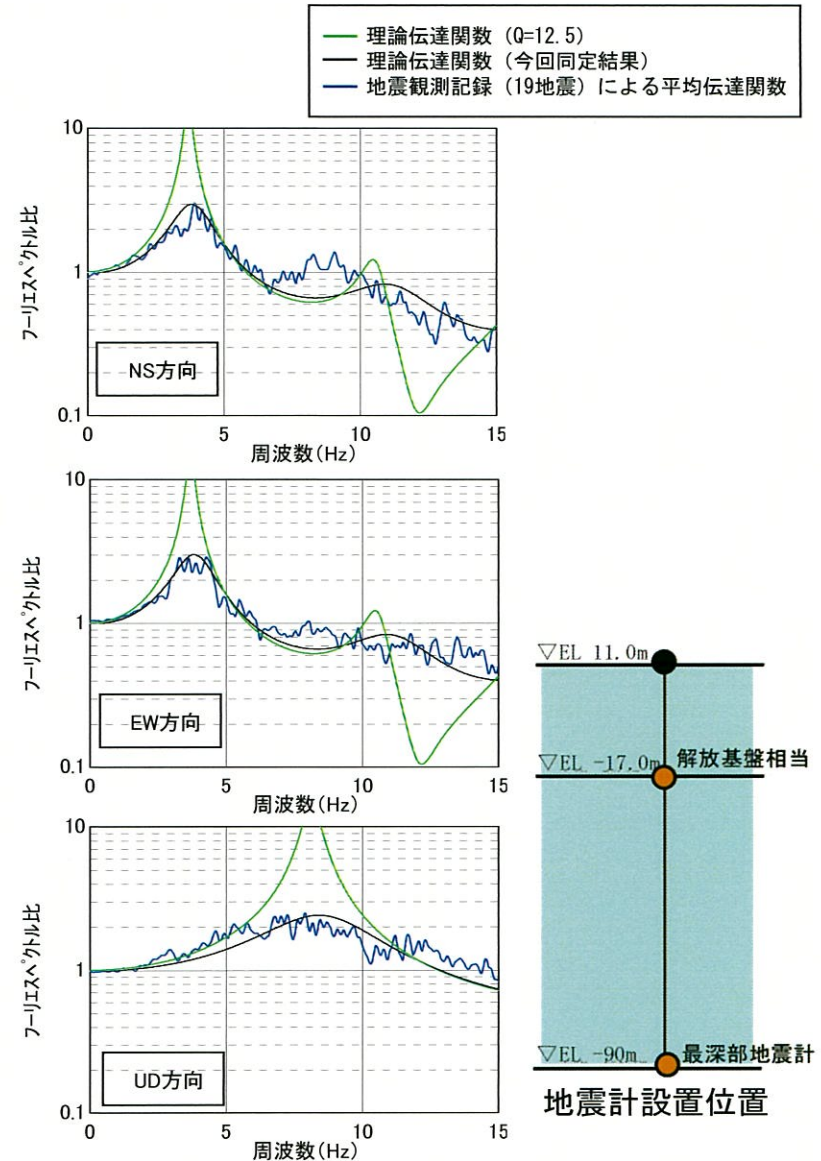
伝達関数による検証

- 鉛直アレイ地震観測記録に基づき、不確かさを考慮して設定した地盤減衰 ($Q=12.5$) を検証。
- 今回設定した地盤減衰を設定した地下構造モデルの理論伝達関数 ($Q=12.5$) と今回同定した地盤減衰を用いた地下構造モデルの理論伝達関数 (今回同定結果) との比較を実施。
- その結果、今回設定した地下構造モデルの理論伝達関数 ($Q=12.5$) のほうが概ね大きいことを確認。

地下構造モデル ($Q=12.5$)

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
11m	0	2.35	1350	3000	12.5
-15m	1	2.35	1350	3000	12.5
-50m	2	2.35	1570	3440	12.5
-100m					

※解放基盤表面 (EL. -15m) 上に0層を追加



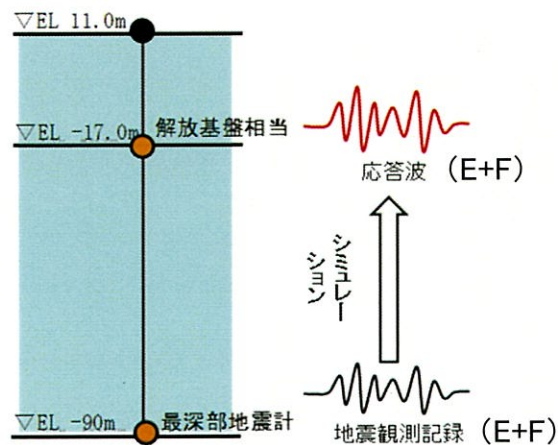
伝達関数の比較
(EL. -17m/EL. -90m)

1. 地下構造モデルの設定

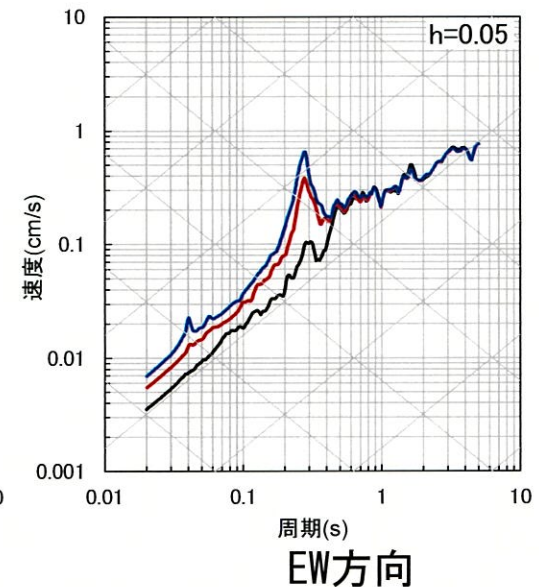
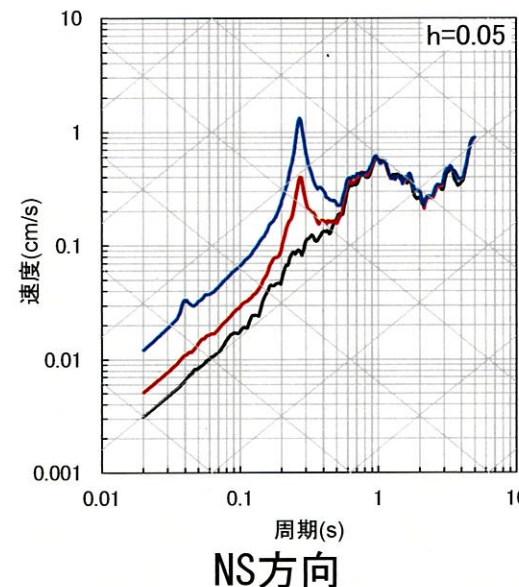
応答スペクトルによる検証

- 鉛直アレイ地震観測記録に基づき、不確かさを考慮して設定した地盤減衰 ($Q=12.5$) の検証のため、最深部地震計 (EL. -90.0m) で得られた地震観測記録を入力とし、上記地盤減衰を設定した地下構造モデルによる1次元波動論に基づき、推定した解放基盤の深さ (EL. -15.0m) における応答波の応答スペクトルと同位置の地震計 (EL. -17.0m) で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施。
- その結果、上記地盤減衰を設定した地下構造モデルを用いて推定した応答波の応答スペクトルは、地震観測記録の応答スペクトルより概ね大きいことを確認。

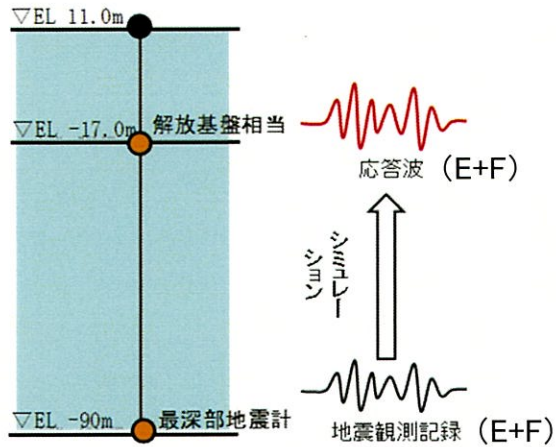
① 鹿児島県北西部



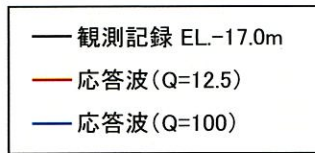
検証のイメージ



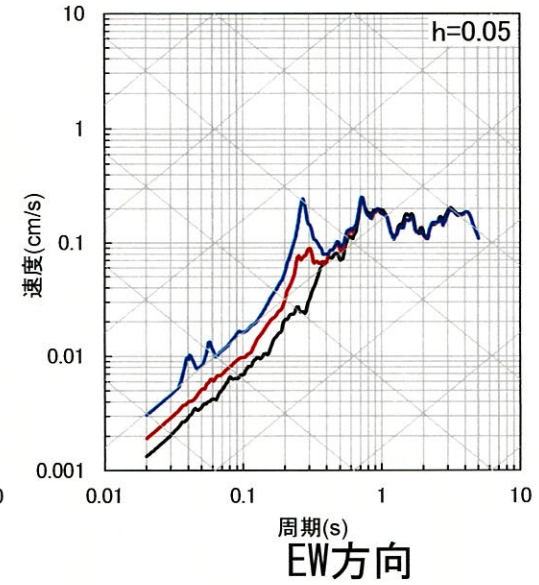
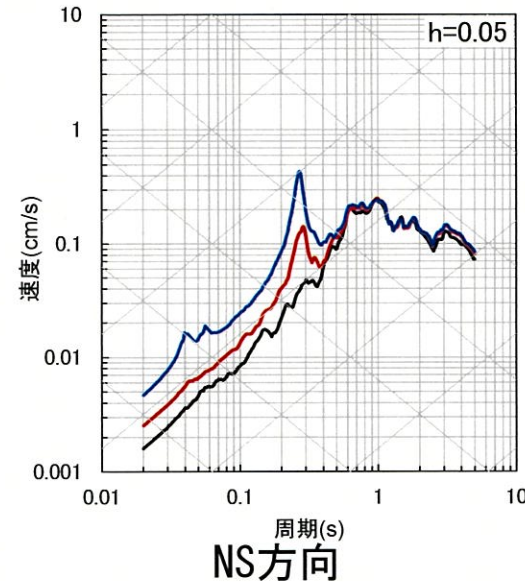
1. 地下構造モデルの設定



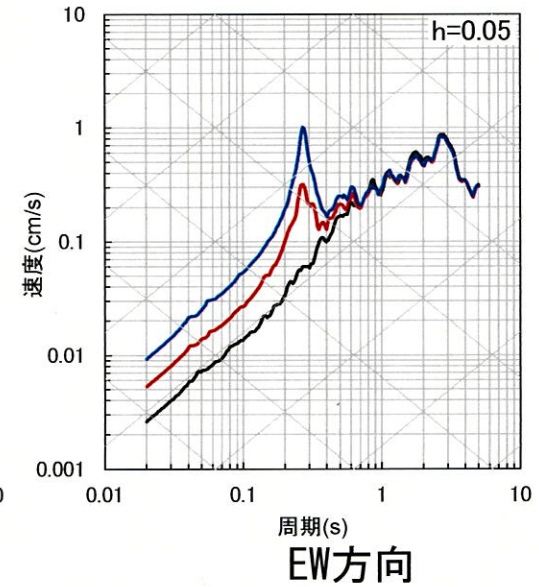
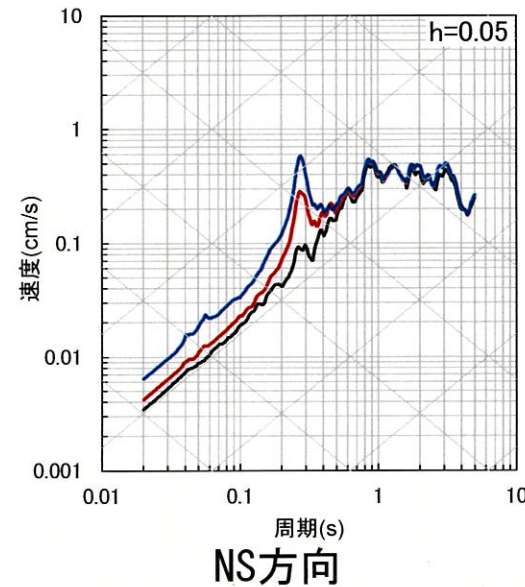
検証のイメージ



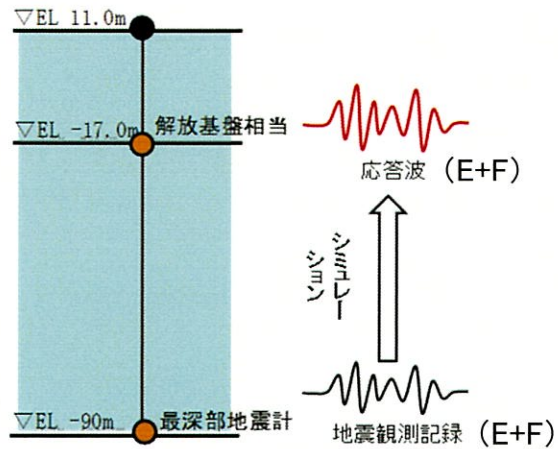
②鹿児島県北西部



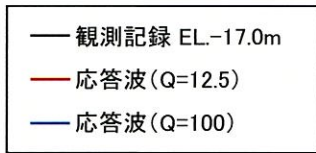
③鹿児島県北西部



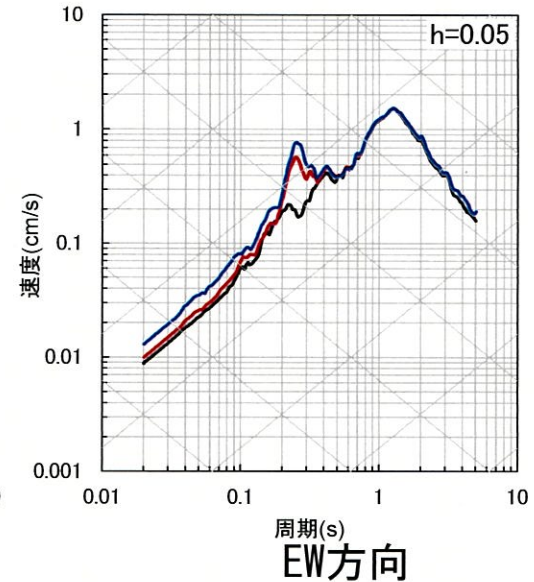
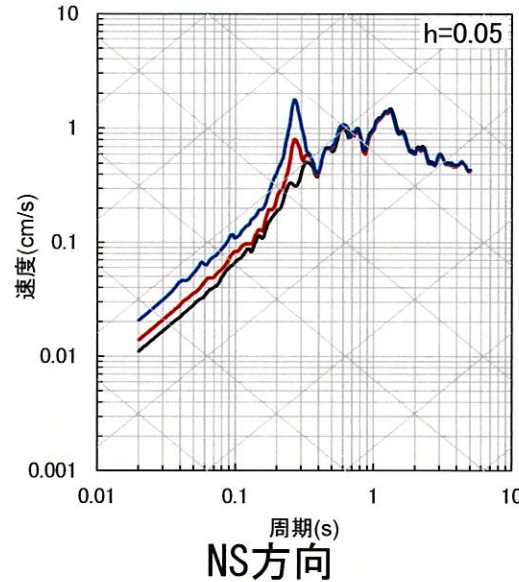
1. 地下構造モデルの設定



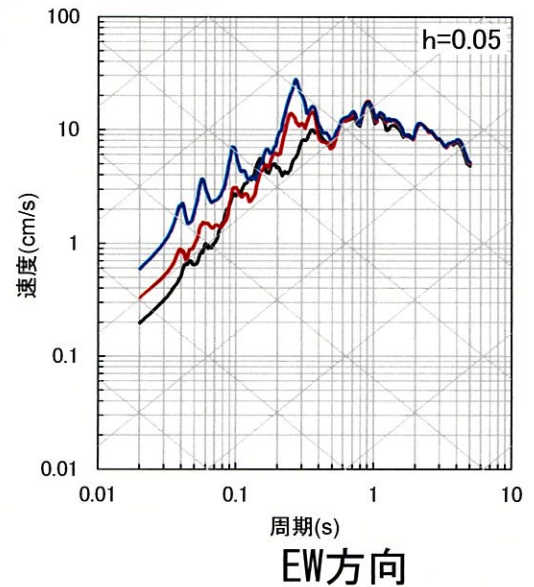
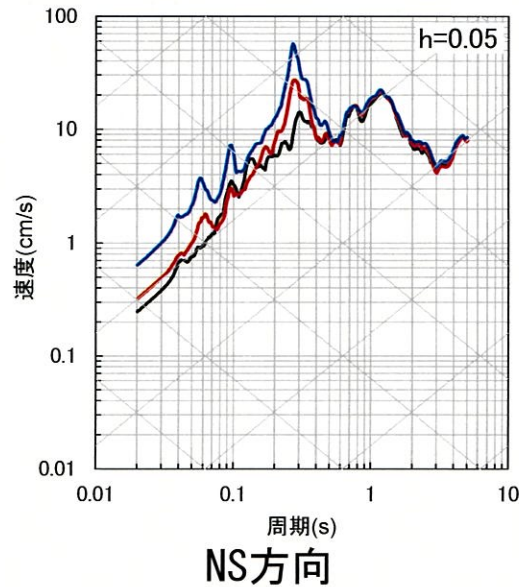
検証のイメージ



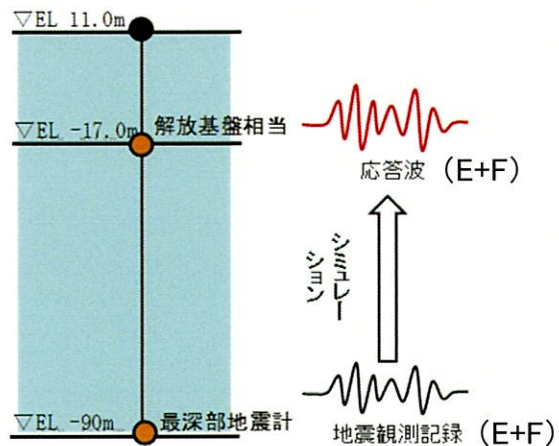
④山口県



⑤九州北西沖 (2005年福岡県西方沖地震本震)



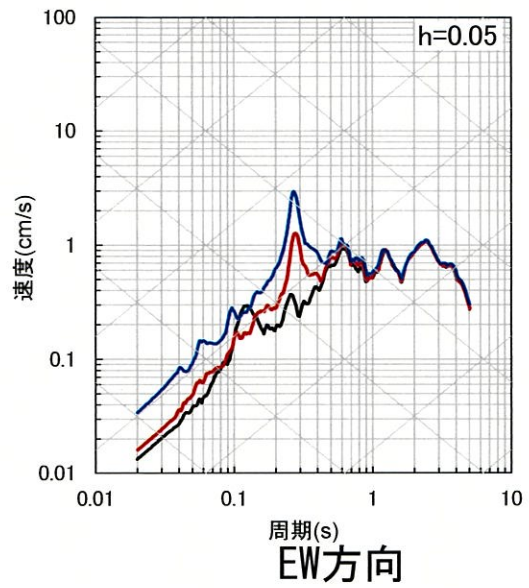
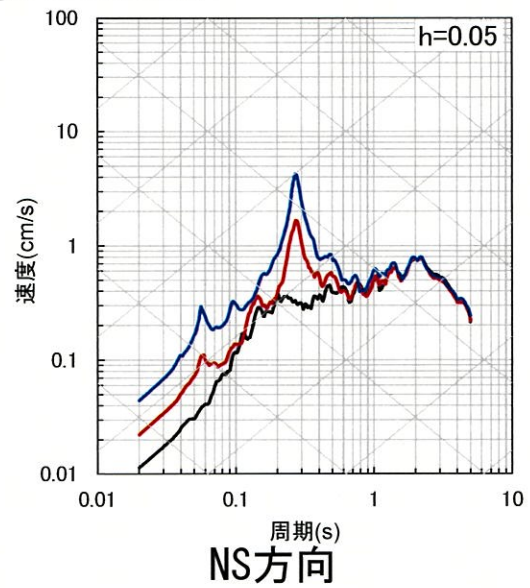
1. 地下構造モデルの設定



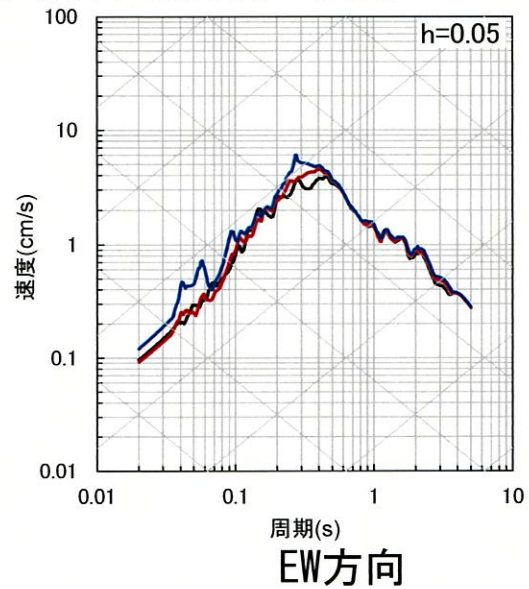
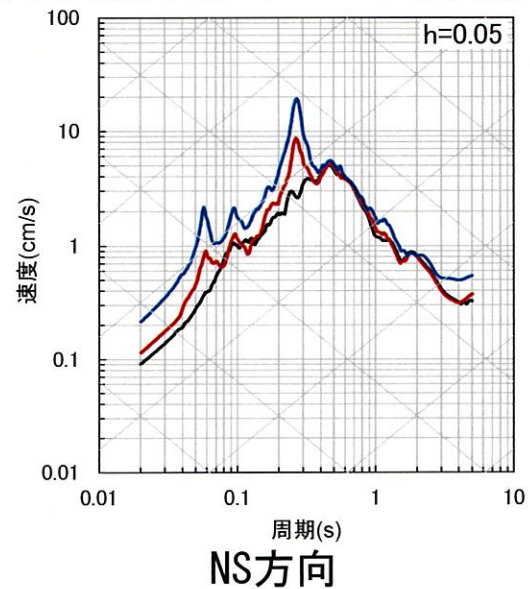
検証のイメージ

- 観測記録 EL-17.0m
- 応答波 (Q=12.5)
- 応答波 (Q=100)

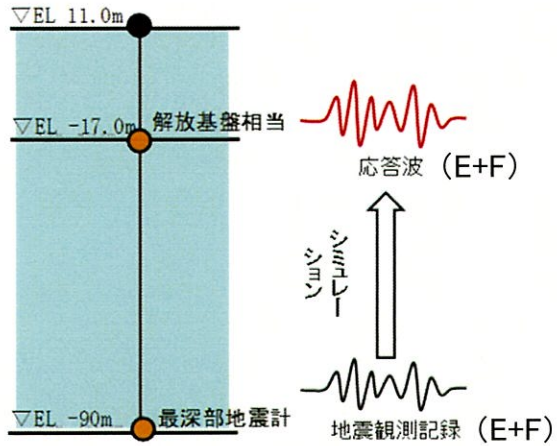
⑥九州北西沖



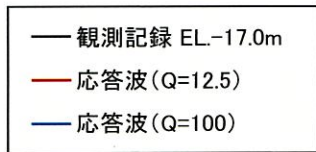
⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



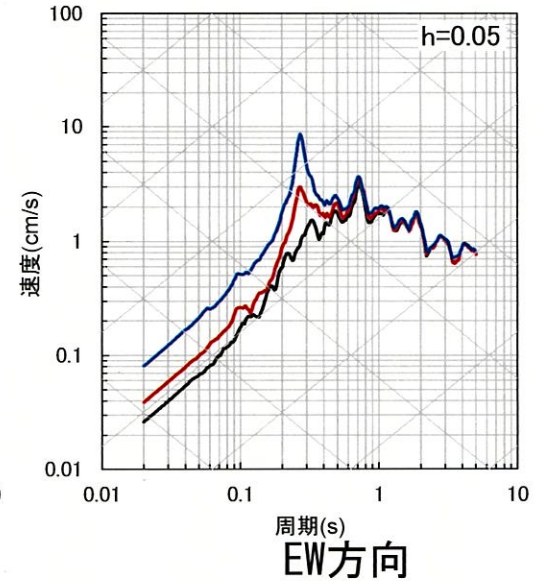
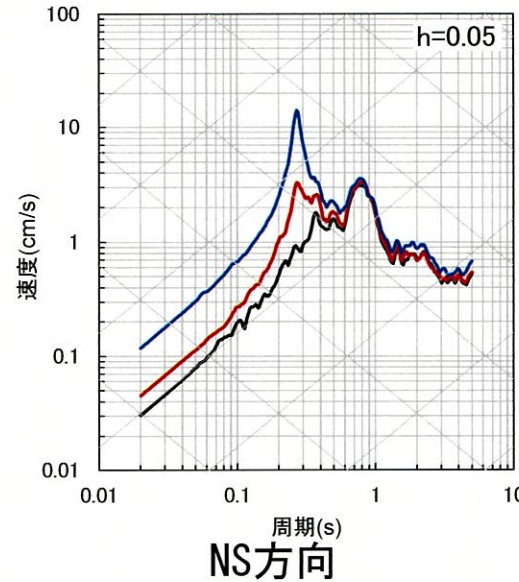
1. 地下構造モデルの設定



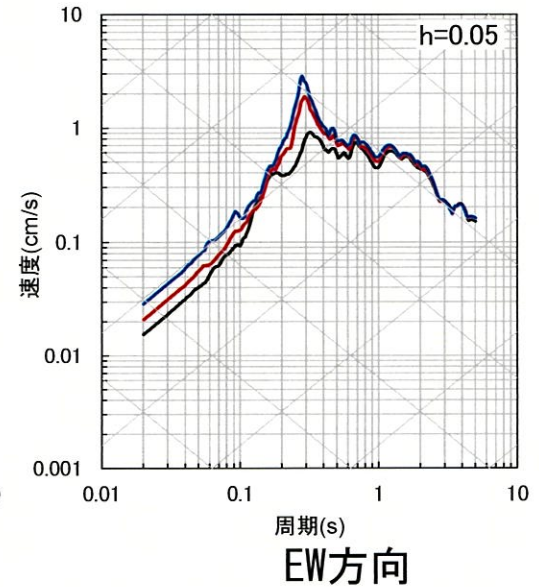
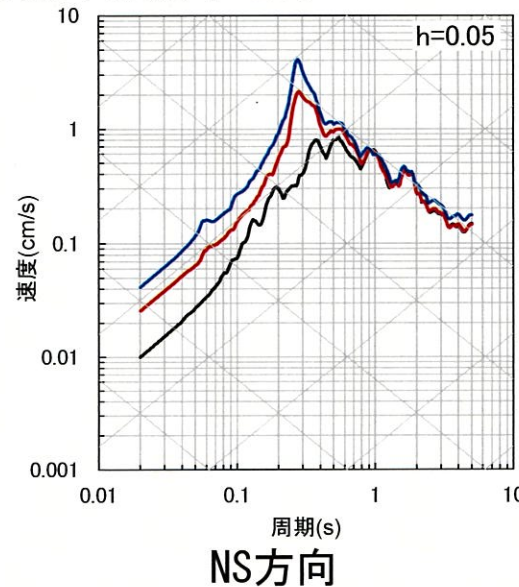
検証のイメージ



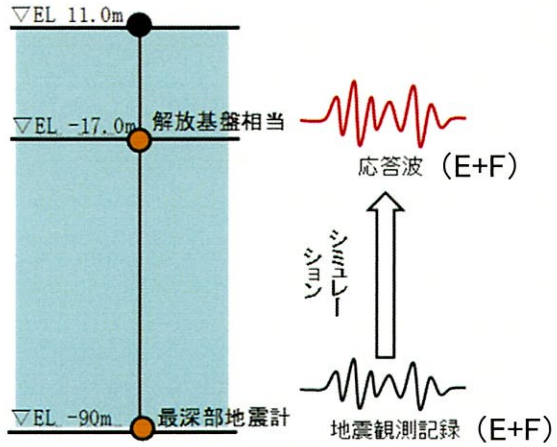
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



⑨熊本県熊本地方



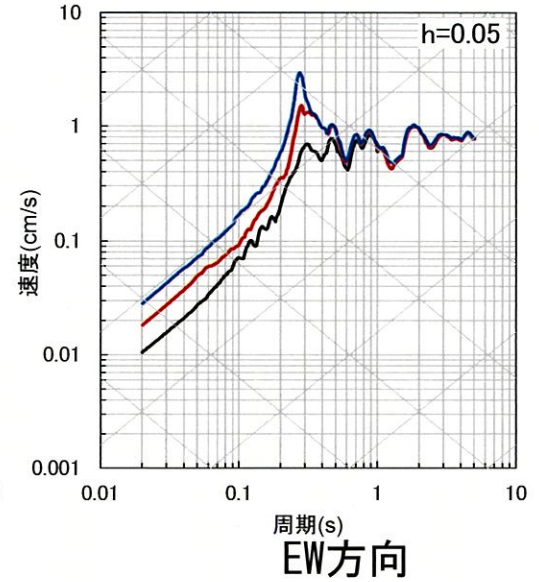
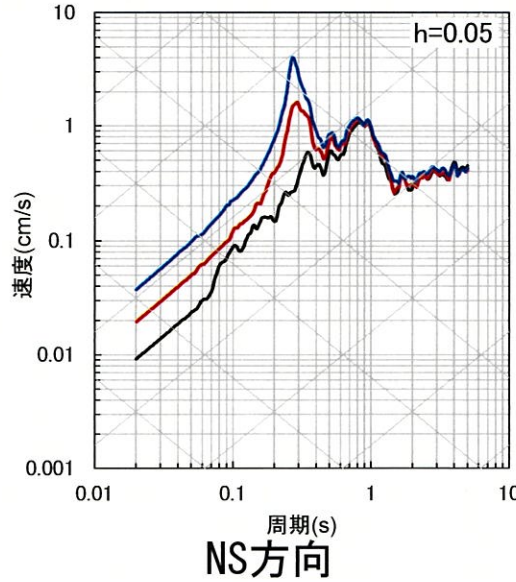
1. 地下構造モデルの設定



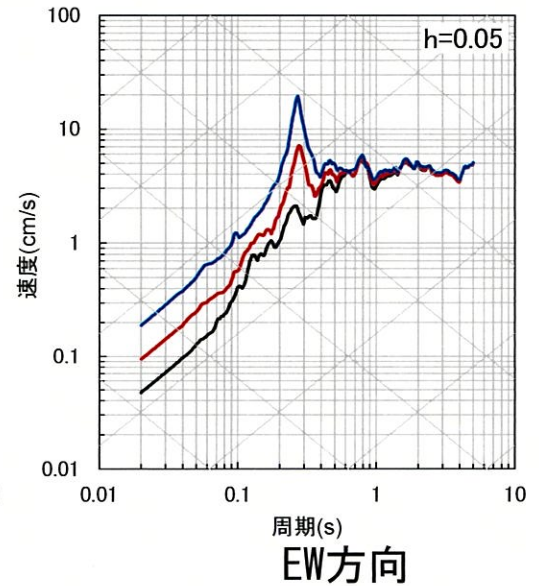
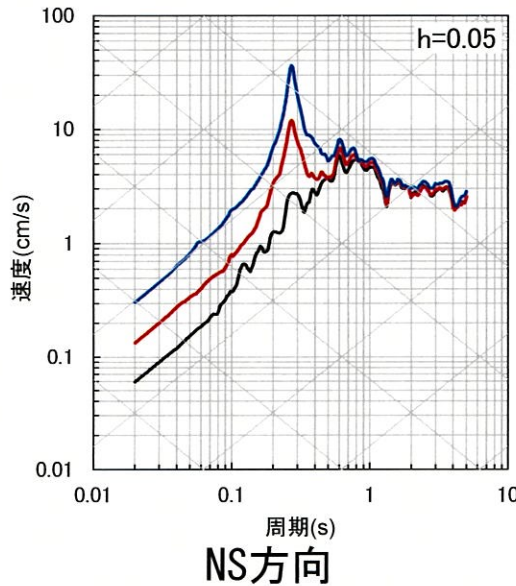
検証のイメージ



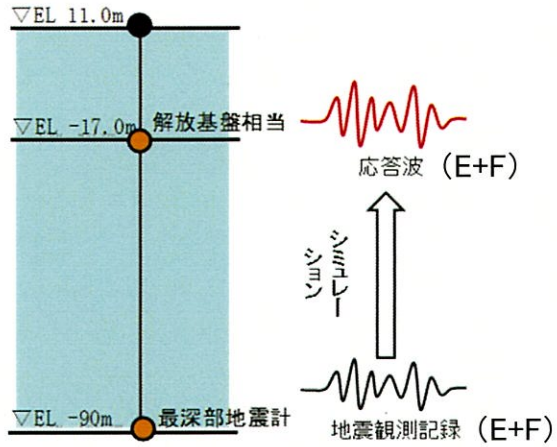
⑩ 熊本県熊本地方



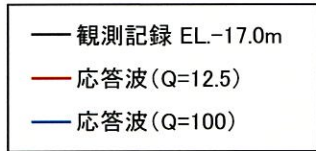
⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



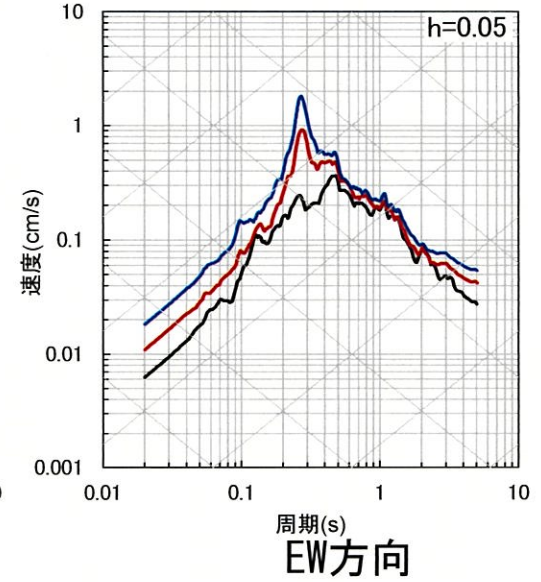
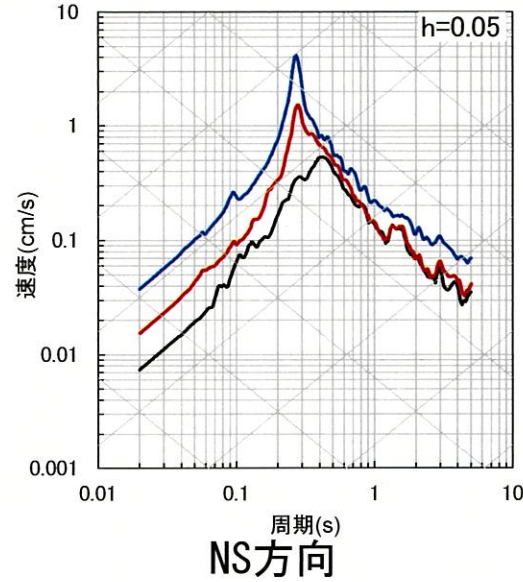
1. 地下構造モデルの設定



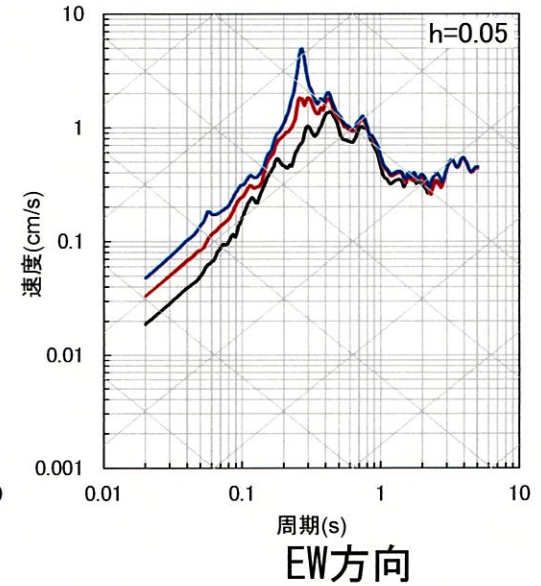
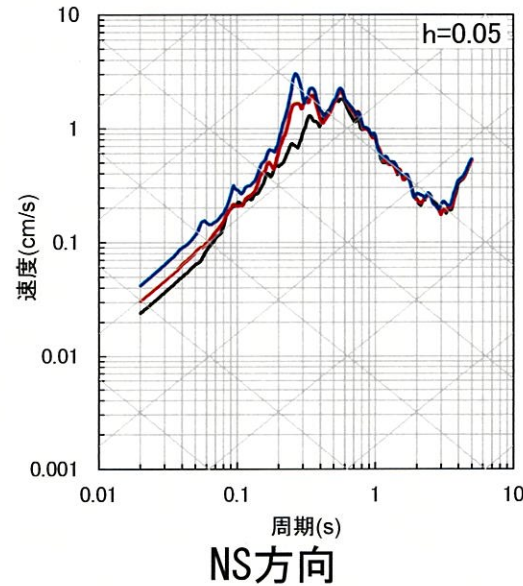
検証のイメージ



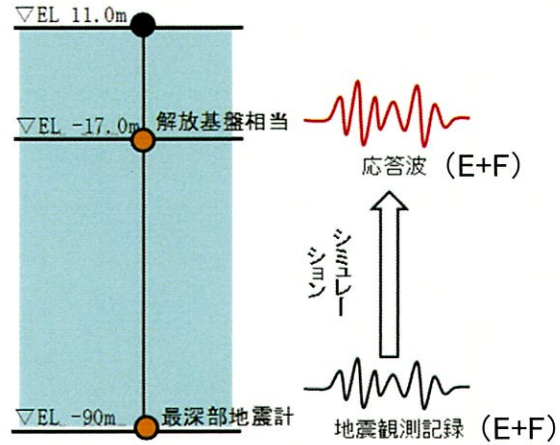
⑫ 熊本県熊本地方



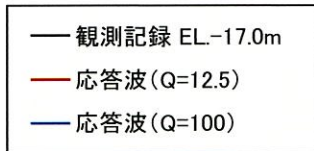
⑬ 熊本県熊本地方



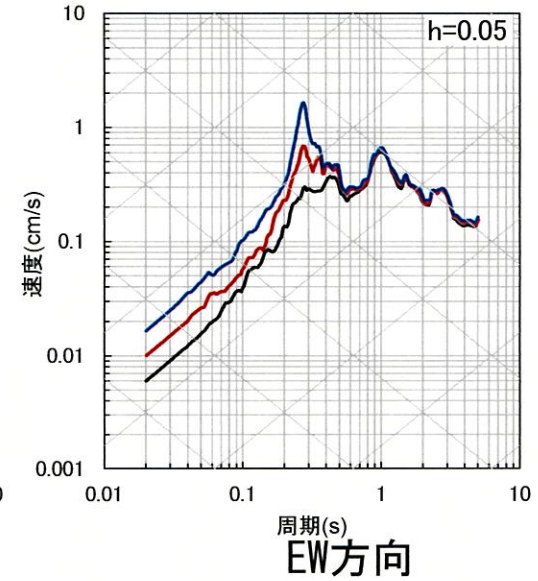
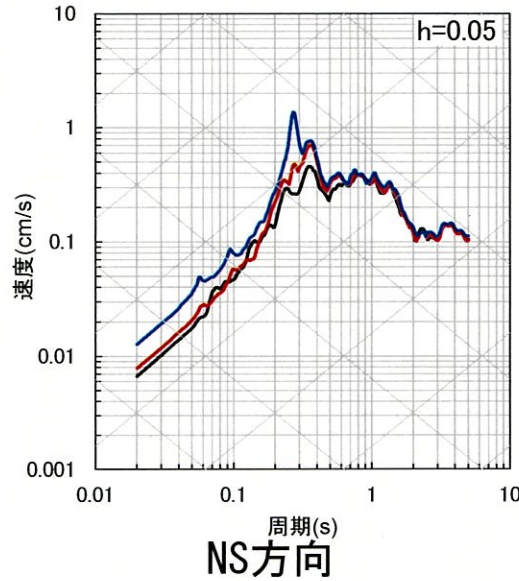
1. 地下構造モデルの設定



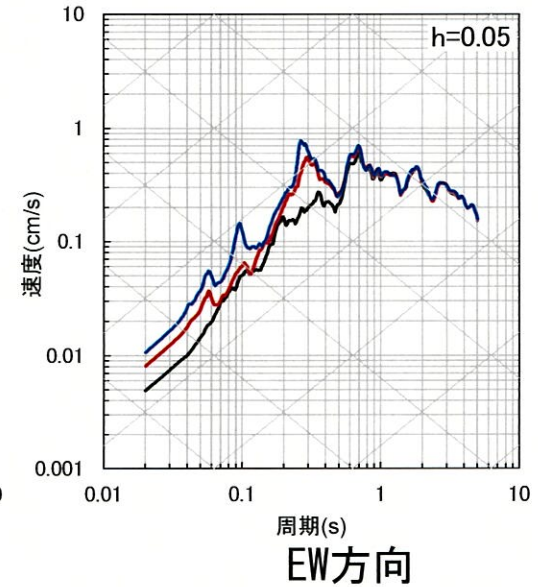
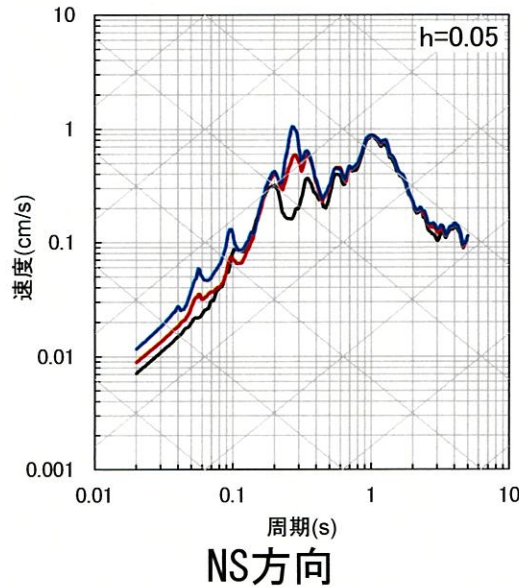
検証のイメージ



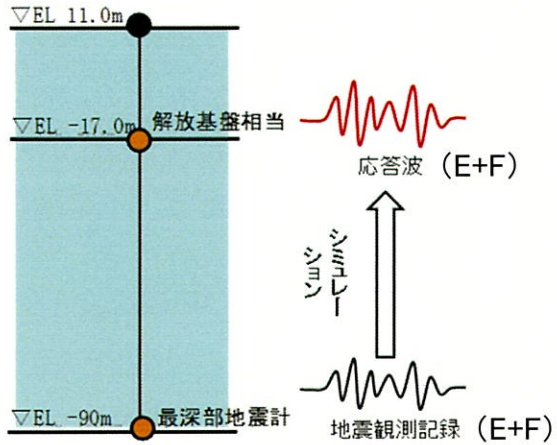
⑭ 熊本県阿蘇地方



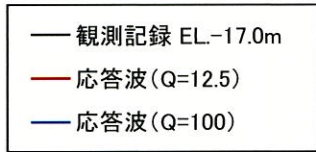
⑮ 熊本県阿蘇地方



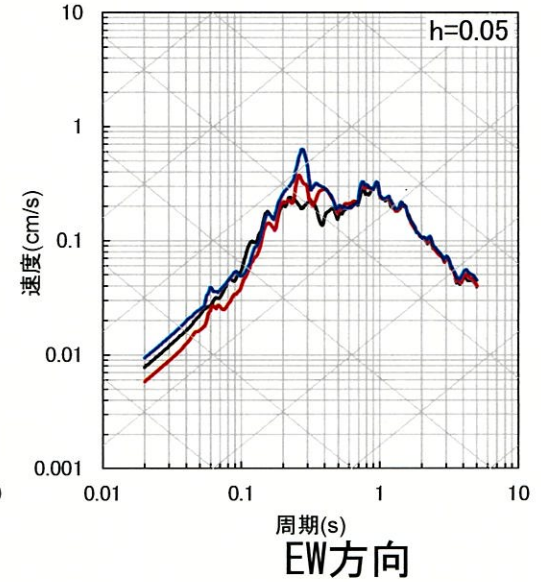
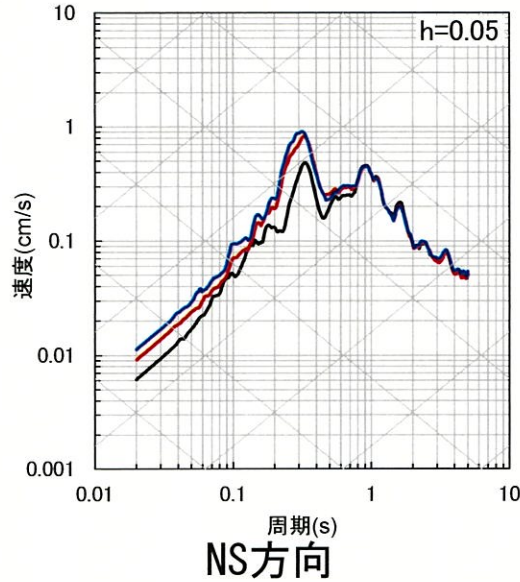
1. 地下構造モデルの設定



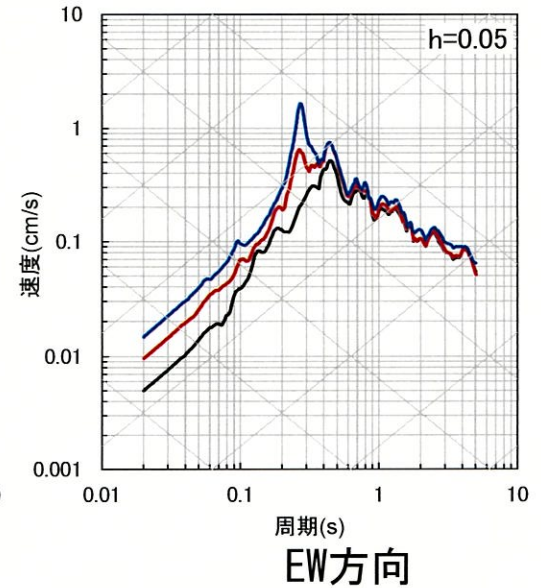
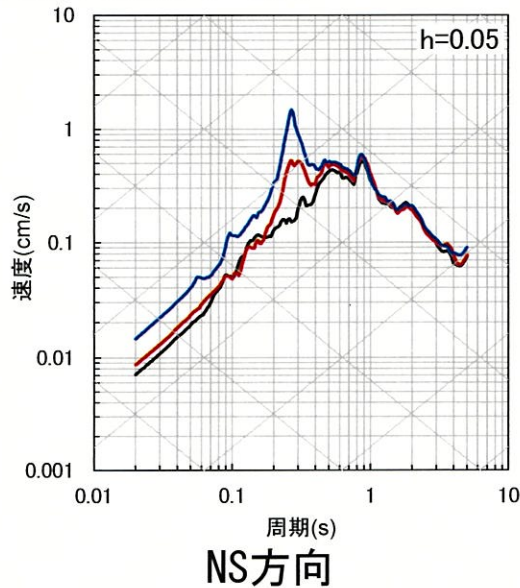
検証のイメージ



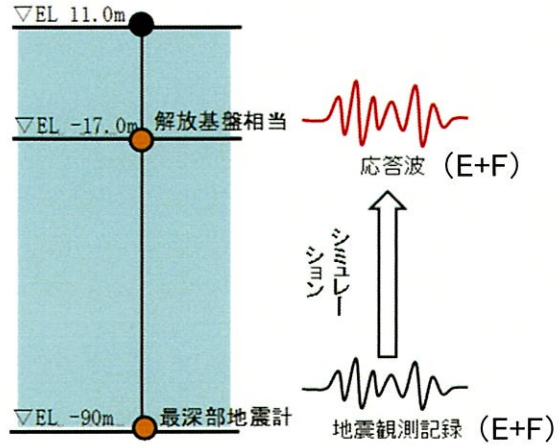
⑩熊本県熊本地方



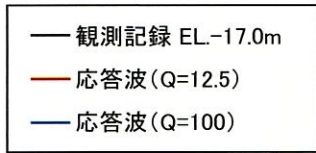
⑪熊本県熊本地方



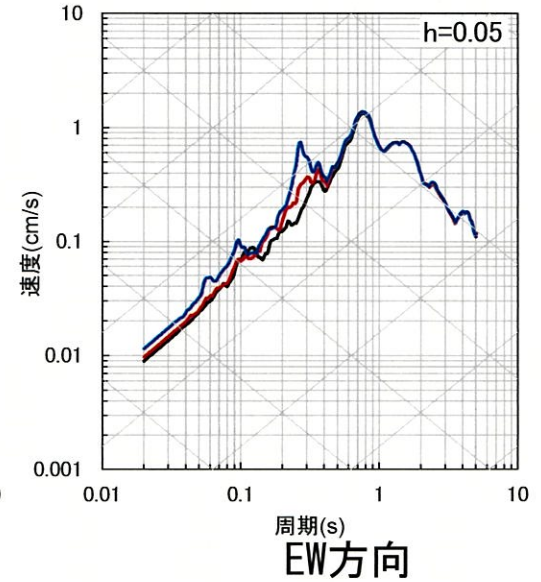
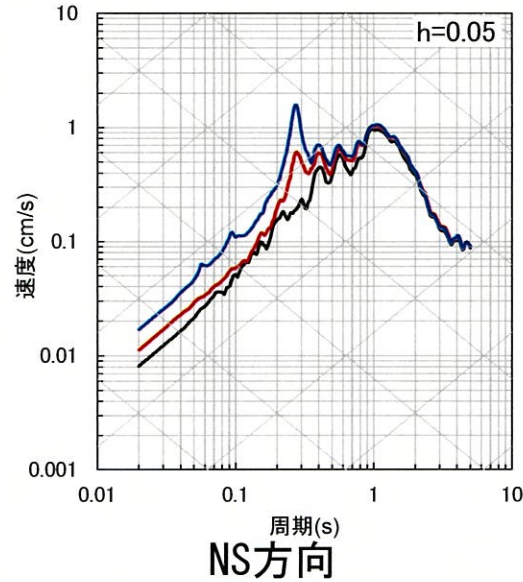
1. 地下構造モデルの設定



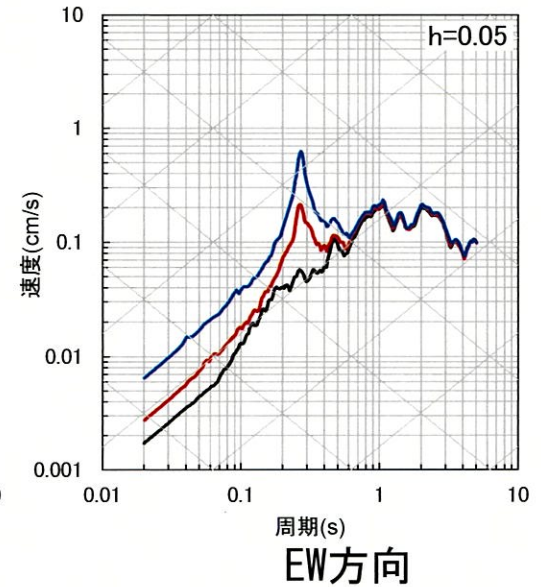
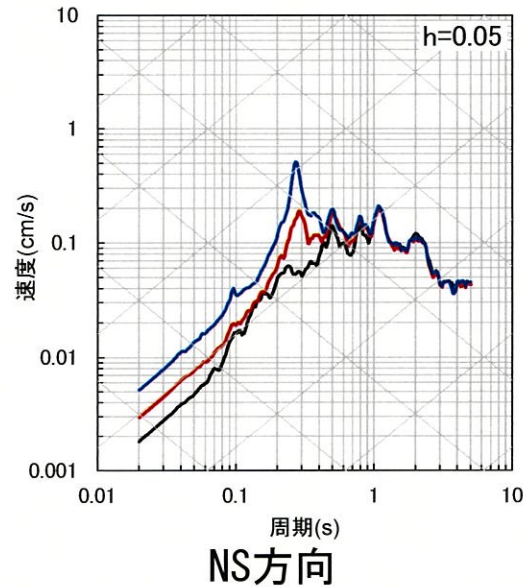
検証のイメージ



⑱ 熊本県阿蘇地方



⑲ 熊本県熊本地方



1. 地下構造モデルの設定

②精緻化範囲の設定及び検証 (EL. -90.0m以深)

原子炉設置位置付近の速度層断面による設定

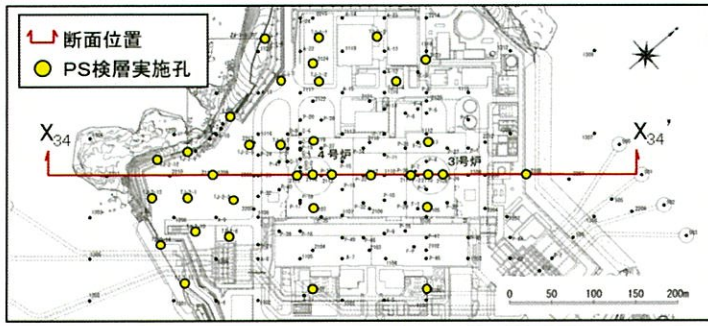
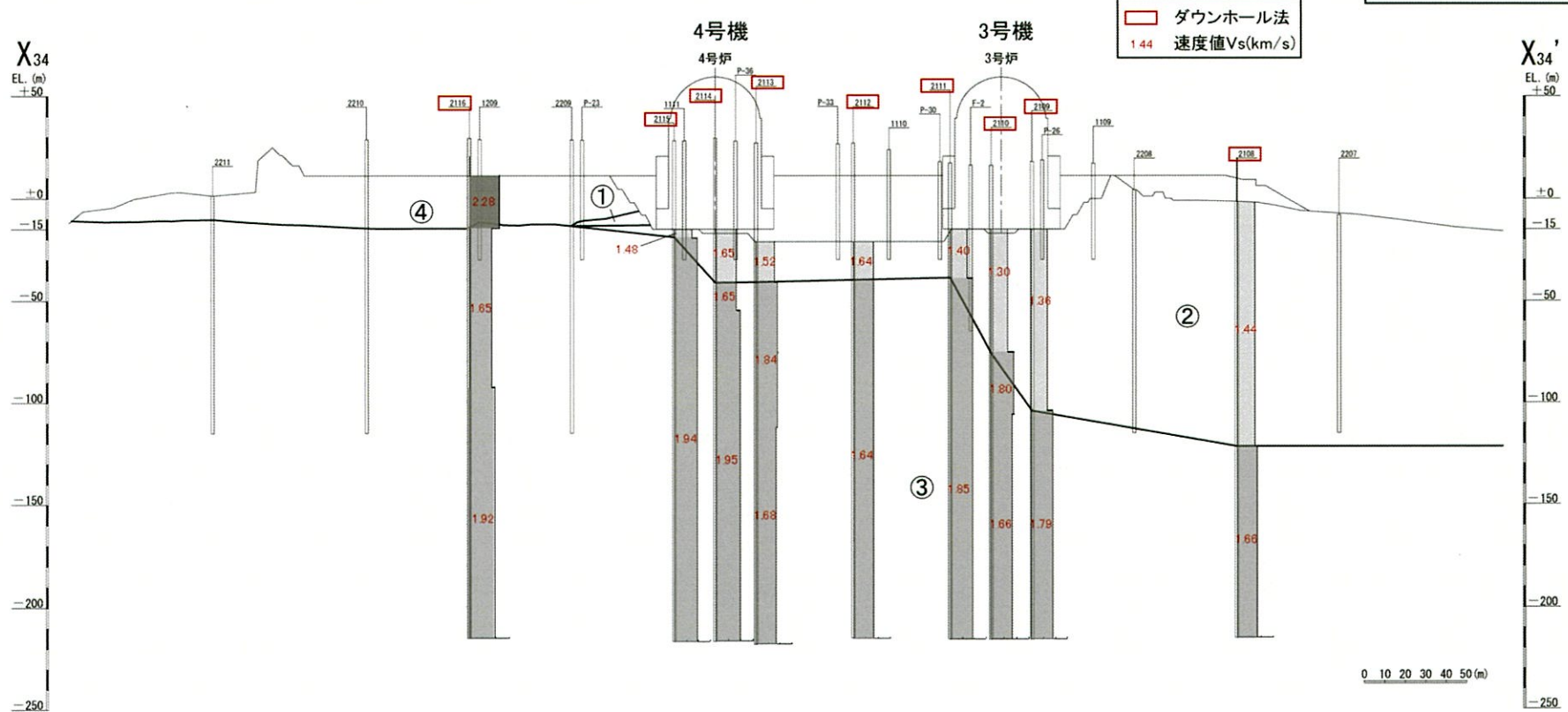
- 前頁までの地震観測記録を用いた検討及び検証により、EL. 11.0mからEL. -90.0mまでの範囲を周波数によらず一律で $Q=12.5$ と設定。
- 地盤減衰 $Q=12.5$ の設定範囲(EL. -90.0m以深)についてEL. -200m程度までのPS検層結果を踏まえた速度層断面を基に検討を実施。
- 29~31頁に示す速度層断面より、鉛直アレイ地震計が設置されるEL. -90.0mより浅部は②、③速度層、EL. -90.0mからEL. -200.0mまでの範囲は③速度層に分類され、両者は同等の速度構造であることを確認。
- これを踏まえ、既許可の地下構造モデルの第5層の層上面のEL. -200mまで $Q=12.5$ と設定。

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値
解放基盤表面						
-15m	1	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m	2	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-100m	3	-0.085	2.35	1730	3470	12.5
-150m	4	-0.135	2.35	1770	3650	12.5
-200m	5	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	6	-1.789	2.60	3100	5500	300
-3015m	7	-3.0	2.70	3500	5900	300
-20015m	8	-20.0	3.00	3800	6600	500
-33015m	9	-33.0	3.30	4300	7600	500

1. 地下構造モデルの設定

第402回
審査会合資料
(一部修正)

速度構造について (X₃₄-X₃₄' 断面) (S波速度)



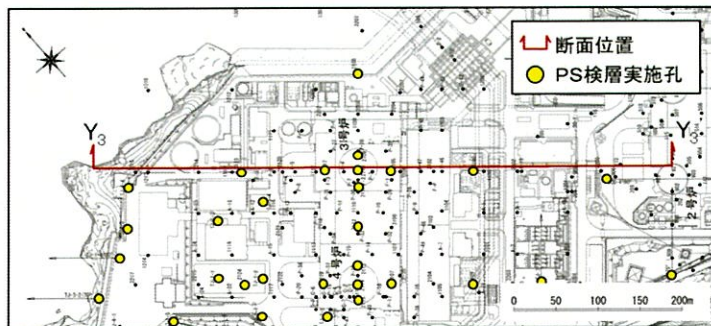
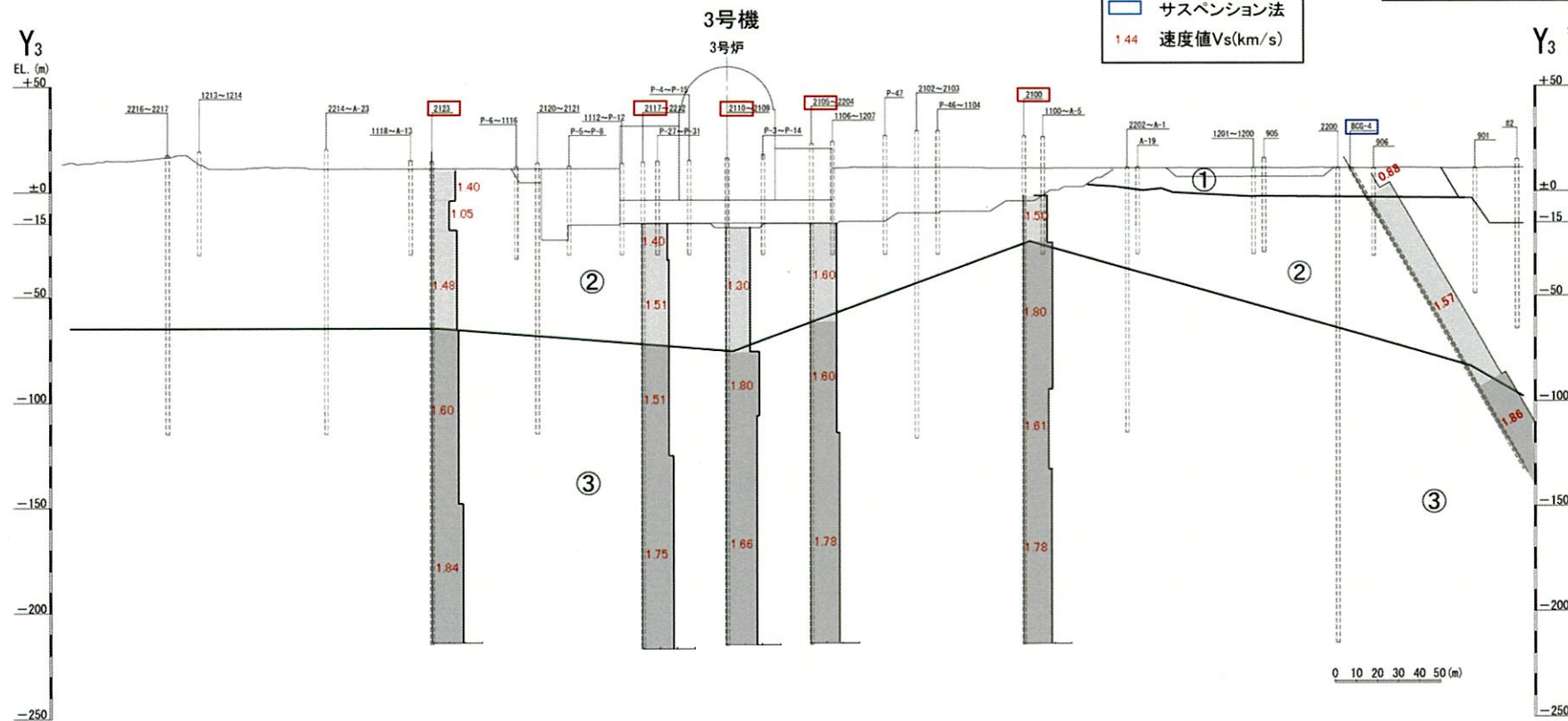
速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・ 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在しない。

1. 地下構造モデルの設定

第402回
審査会合資料
(一部修正)

速度構造について (Y₃-Y₃' 断面) (S波速度)



速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

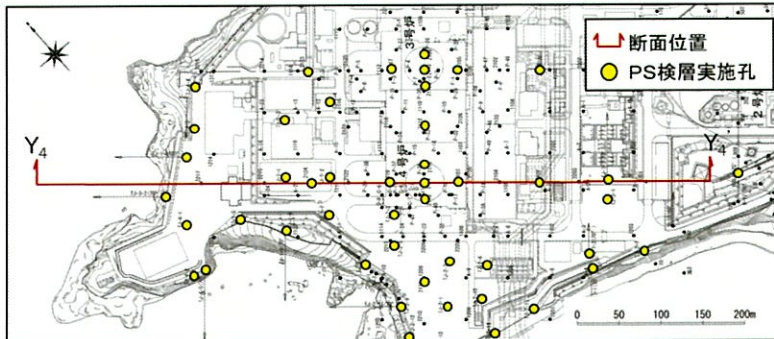
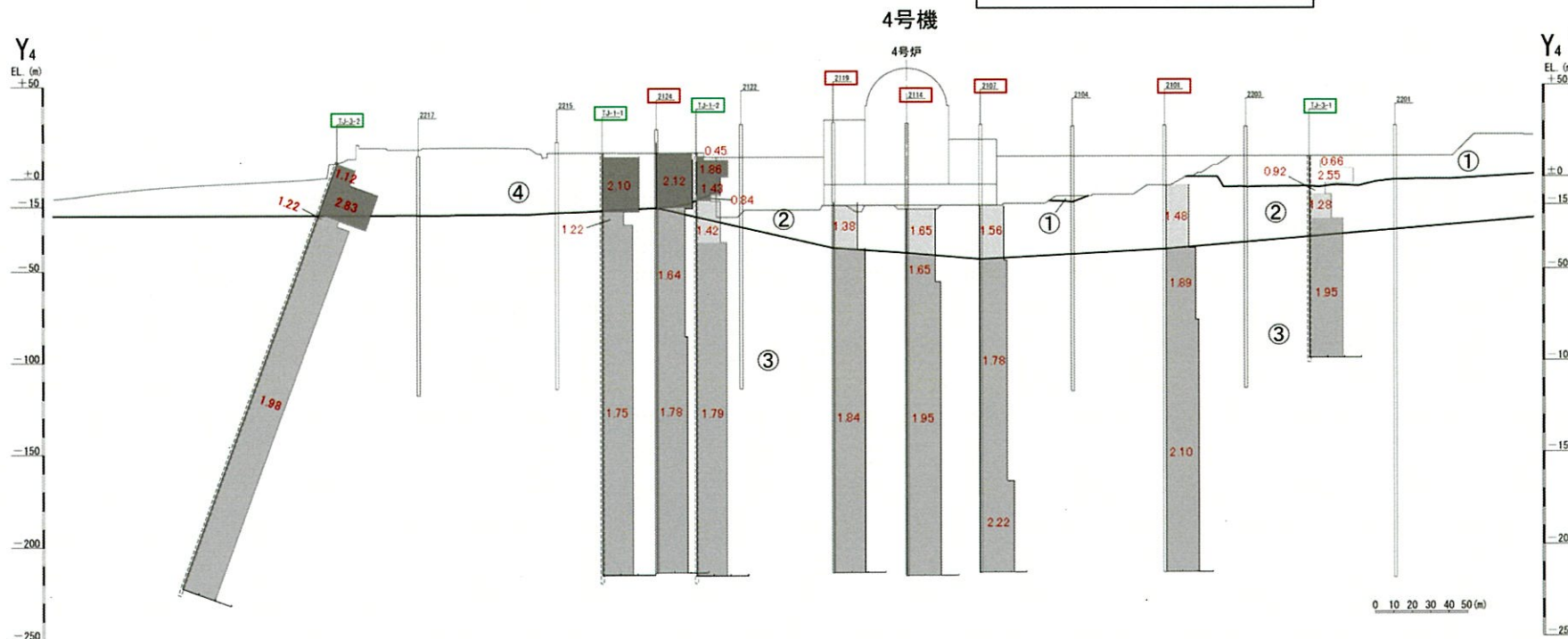
- ・原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (Vs=約1.4~1.8km/s) を示す。
- ・速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

1. 地下構造モデルの設定

第402回
審査会合資料
(一部修正)

速度構造について (Y₄-Y₄' 断面) (S波速度)

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



速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (V_s=約1.4~1.8km/s) を示す。
- 速度構造に極端なコントラストを示す領域は存在せず、おおむね水平な速度構造と評価される。

1. 地下構造モデルの設定

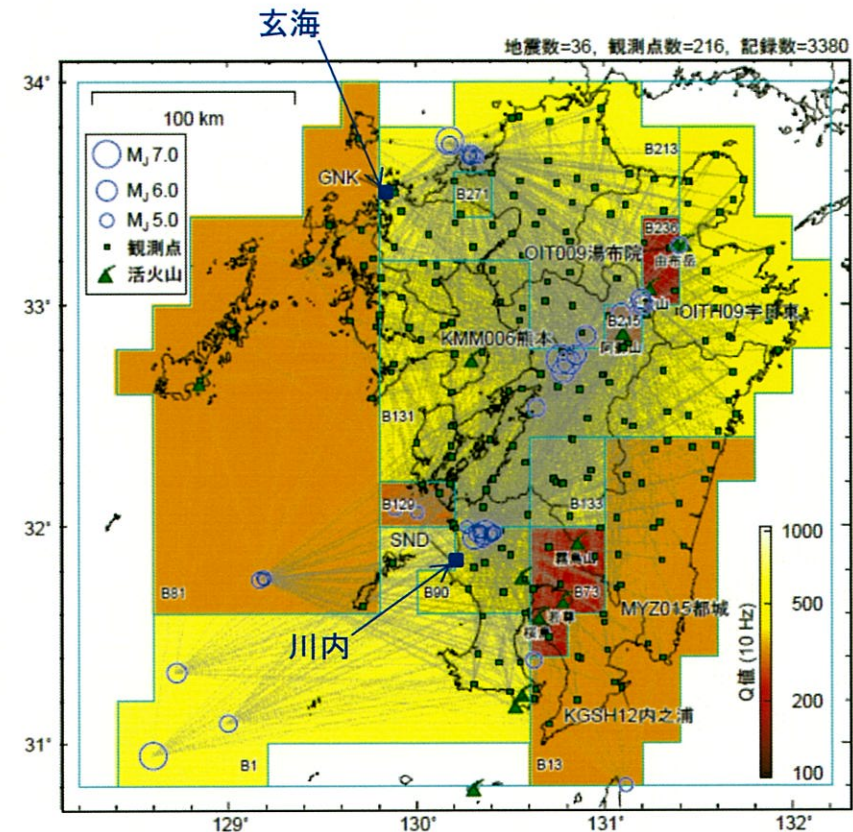
地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

- 友澤ほか(2019a)^{5),6)}では、九州地域周辺で発生した地震におけるK-NET、KiK-net、川内原子力発電所及び玄海原子力発電所の観測記録を用いて、九州地域の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性をブロックインバージョン解析※により推定。
- ブロックインバージョン解析では、伝播経路特性の不均質性を考慮。

○ 検討に用いた観測記録は、以下の方針により選定。

- ・ 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/s²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

※ ブロックインバージョン解析は、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域や伊予灘周辺の地震を対象とした既往研究^{7),8)}あり。



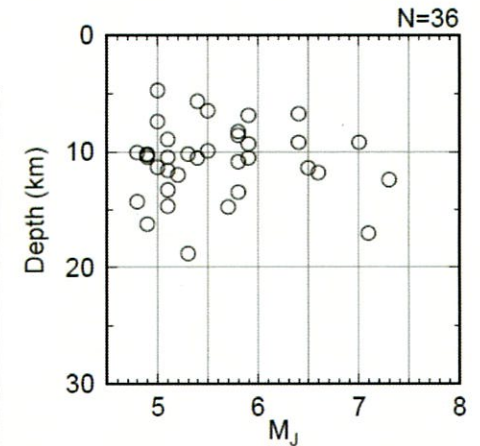
検討に用いた地震の震央分布及び観測点位置

友澤ほか(2019a)に加筆

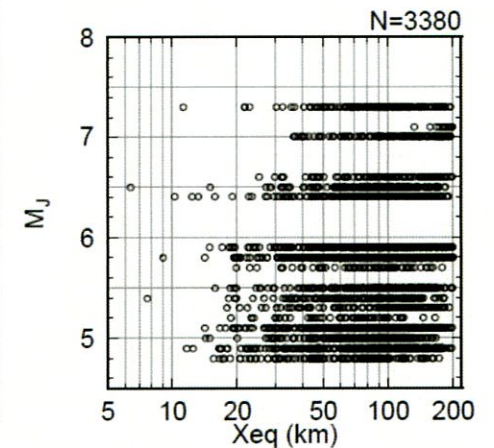
1. 地下構造モデルの設定

検討に用いた地震諸元 (計36地震)

番号	地震名	発生日	Mj	震源深さ (km)	番号	地震名	発生日	Mj	震源深さ (km)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	11.9	⑱	福岡県福岡地方	2005年5月2日	5.0	11.4
②	鹿児島県北西部	1997年3月26日	4.9	10.2	⑳	天草灘	2006年2月4日	5.1	11.6
③	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	14.8	㉑	天草灘	2012年8月17日	4.9	10.5
④	鹿児島県北西部	1997年4月4日	4.8	14.3	㉒	種子島近海	2015年8月17日	5.0	7.4
⑤	鹿児島県北西部	1997年4月5日	5.2	12.0	㉓	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	17.0
⑥	鹿児島県北西部	1997年4月9日	5.1	10.5	㉔	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	9.4
⑦	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	9.2	㉕	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	11.4
⑧	鹿児島県北西部	1997年5月14日	5.1	8.9	㉖	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	8.3
⑨	鹿児島県北西部	2003年4月12日	4.9	10.3	㉗	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	6.7
⑩	鹿児島県北西部	2003年11月30日	4.8	10.1	㉘	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	12.5
⑪	九州南西沖	2004年12月12日	5.1	14.7	㉙	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	10.6
⑫	九州南西沖	2004年12月13日	4.9	16.2	㉚	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	6.9
⑬	九州南西沖	2004年12月14日	5.3	18.8	㉛	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	10.9
⑭	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	9.2	㉜	大分県中部	2016年4月16日	5.4	5.7
⑮	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	10.5	㉝	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	8.6
⑯	福岡県中部	2005年4月10日	5.0	4.7	㉞	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	10.0
⑰	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	13.5	㉟	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	6.5
⑱	福岡県中部	2005年4月20日	5.1	13.3	㊱	鹿児島湾	2017年7月11日	5.3	10.2



Mj-震源深さの分布



Xeq-Mjの分布

友澤ほか(2019a)

1. 地下構造モデルの設定

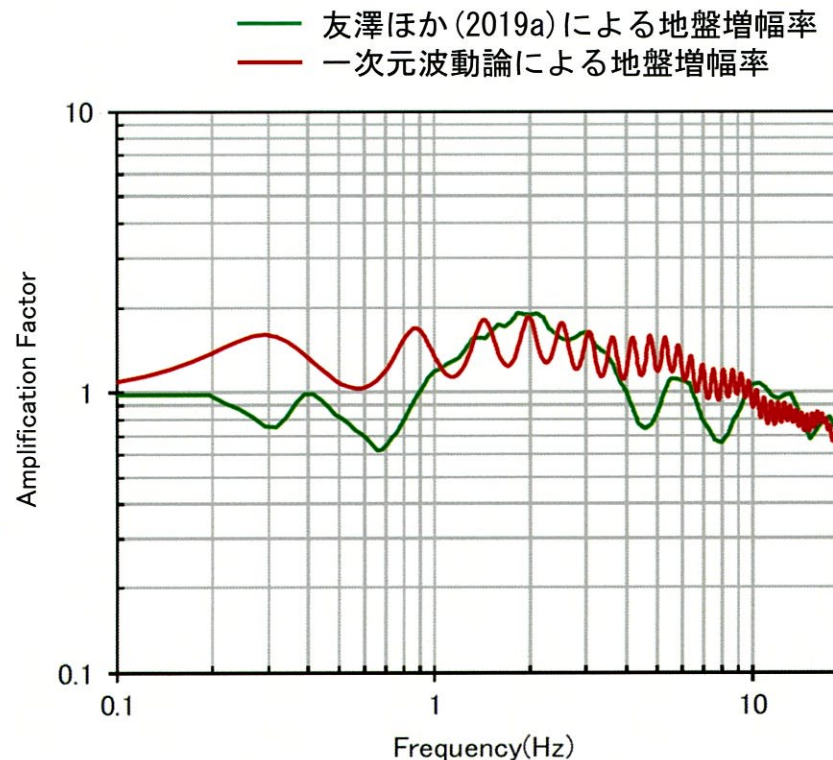
地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

- 友澤ほか(2019a)では、地中観測点が地震基盤とみなせるOITH09(宇目東)とKGSH12(内之浦)を基準点としており、推定されたサイト増幅特性は $V_s=3000\text{m/s}$ 程度からの地盤増幅率と見なせる。
- 友澤ほか(2019a)では、玄海原子力発電所のサイト増幅特性が推定されており、前出の地下構造モデルにおける $V_s=3000\text{m/s}$ 相当の層上面から地表まで一次元波動論に基づく算出した地盤増幅率との比較を実施した結果、友澤ほか(2019a)による地盤増幅率より概ね大きいことを確認。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる
一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	Q値
+11m	0	2.35	1350	12.5
-15m	1	2.35	1350	12.5
-50m	2	2.35	1570	12.5
-100m	3	2.35	1730	12.5
-150m	4	2.35	1770	12.5
-200m	5	2.40	2100	200
-1804m	6	2.60	3100	300
-3015m	7	2.70	3500	300
-20015m	8	3.00	3800	500
-33015m	9	3.30	4300	500

解放基盤表面 (EL. -15m) 上に0層を追加



1. 地下構造モデルの設定

- 以上を踏まえ、既許可の長周期帯の理論的方法に用いる一次元地下構造モデルを基に、EL. -200mから解放基盤表面 (EL. -15.0m) までの地盤減衰を $Q=12.5$ と設定した地下構造モデルを用いて、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価を実施。

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
解放基盤表面						
-15m	1	0.0	2.35	1350	3000	12.5
-50m	2	-0.035	2.35	1570	3440	12.5
-100m	3	-0.085	2.35	1730	3470	12.5
-150m	4	-0.135	2.35	1770	3650	12.5
-200m	5	-0.185	2.40	2100	4000	200
-1804m	6	-1.789	2.60	3100	5500	300
-3015m	7	-3.0	2.70	3500	5900	300
-20015m	8	-20.0	3.00	3800	6600	500
-33015m	9	-33.0	3.30	4300	7600	500

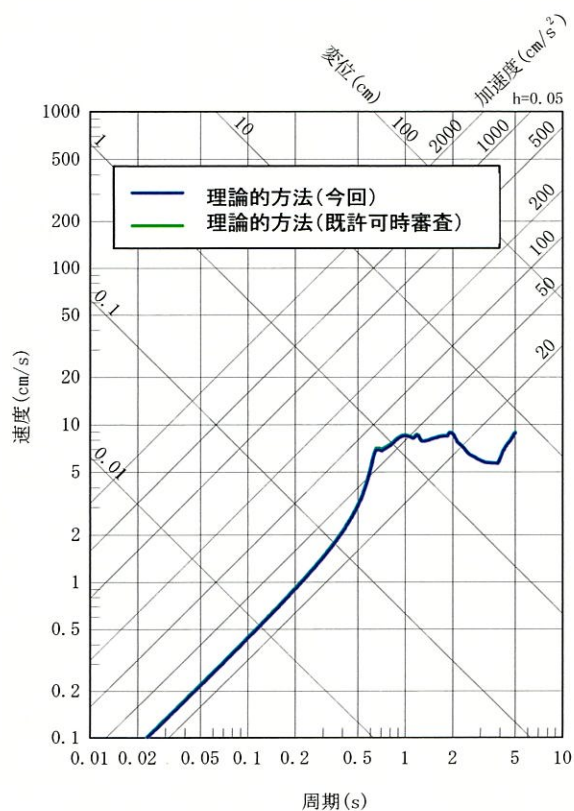
2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動を評価するにあたり、既許可の地下構造モデルの地盤減衰を精緻化したことに伴い、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の影響について整理。
- 現行の基準地震動Ss-2及びSs-3は、経験的グリーン関数法により策定しており、地下構造モデルを用いていない。
- 既許可において、地下構造モデルを用いた理論的方法による影響評価や統計的グリーン関数法による妥当性確認を実施。
 - ① 長周期帯において、理論的方法による地震動評価を実施。
⇒ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いて、再度、理論的方法による地震動評価を実施(37、38頁参照)。
 - ② 経験的グリーン関数法による地震動評価の妥当性確認のため、統計的グリーン関数法による地震動評価を実施(39、40頁参照)。
⇒ 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いて、再度、統計的グリーン関数法による地震動評価を実施(41、42頁参照)。
- 以上より、既許可の地下構造モデルの地盤減衰を精緻化したことが、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」に与える影響がないことを確認。

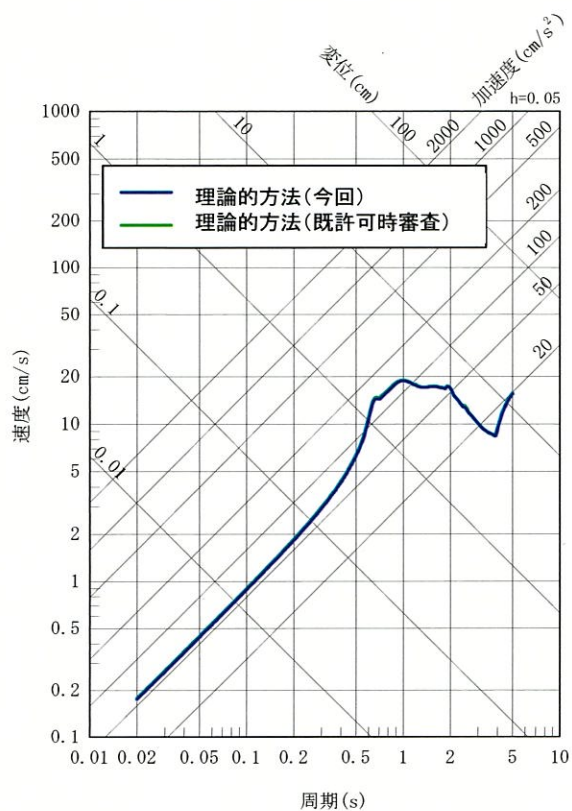
2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いて、再度、理論的方法による地震動評価を実施した結果、既許可の理論的方法による地震動評価結果と同等であることを確認。

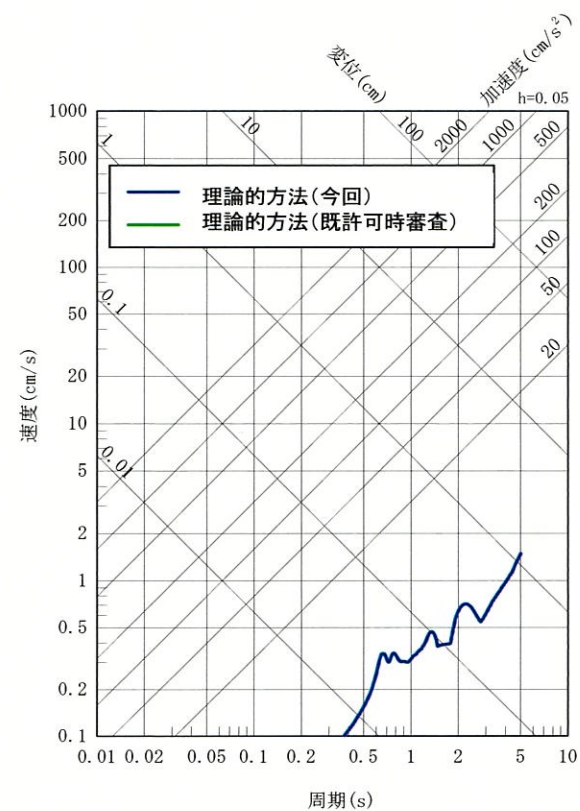
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



NS方向



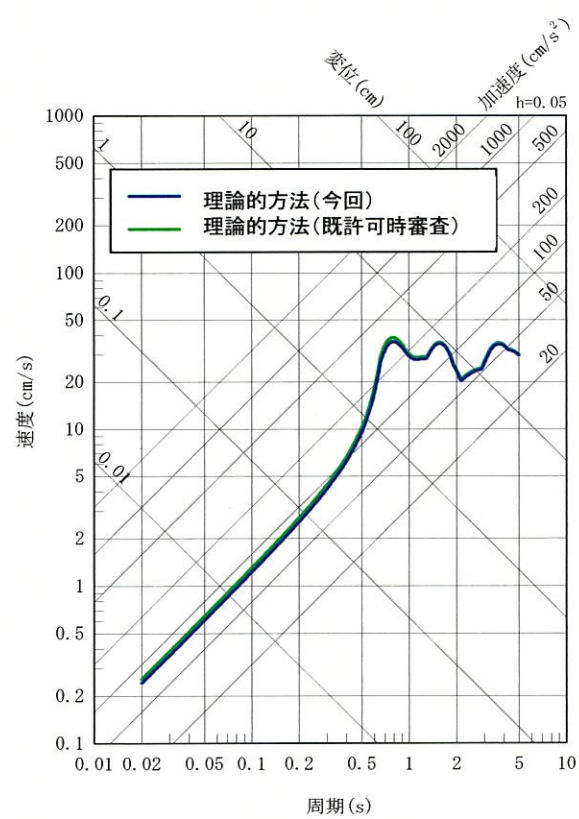
EW方向



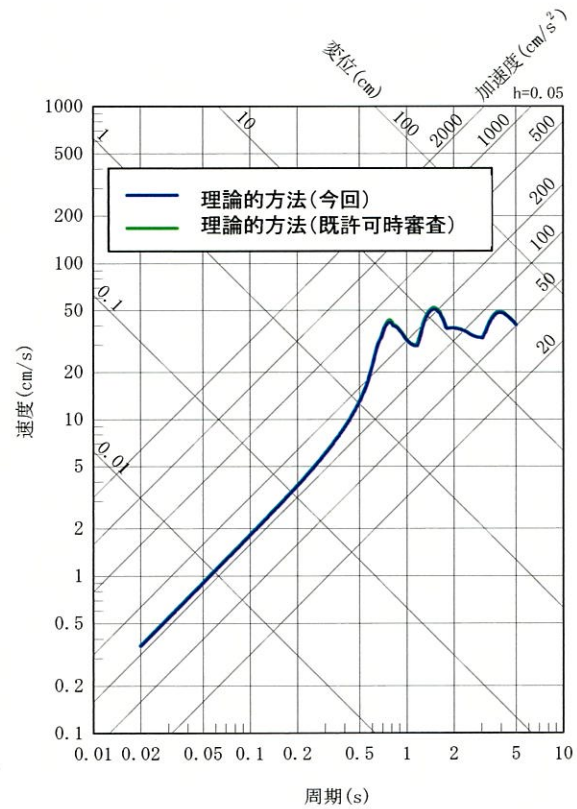
UD方向

2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

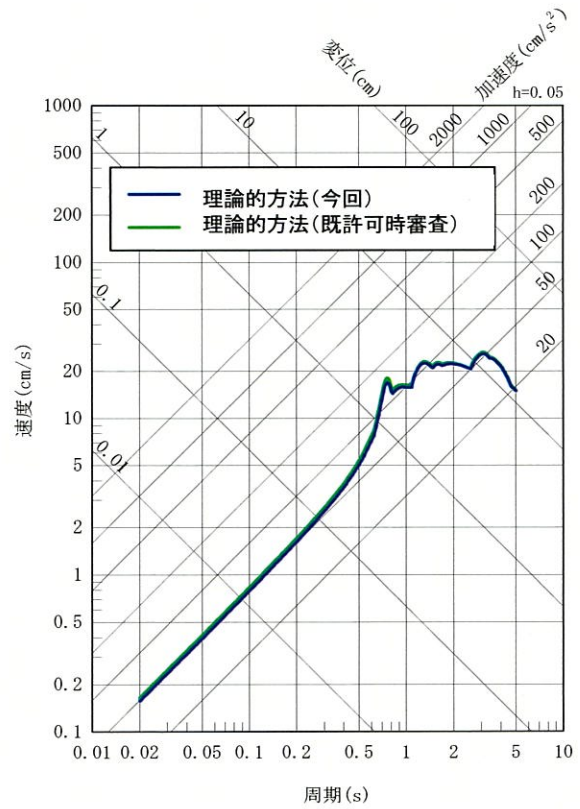
「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



NS方向



EW方向



UD方向

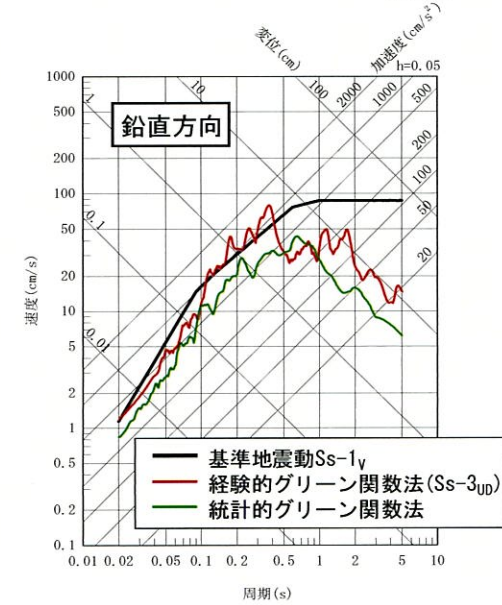
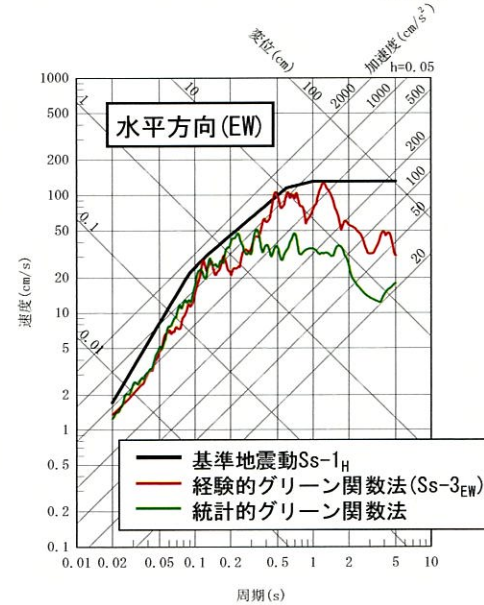
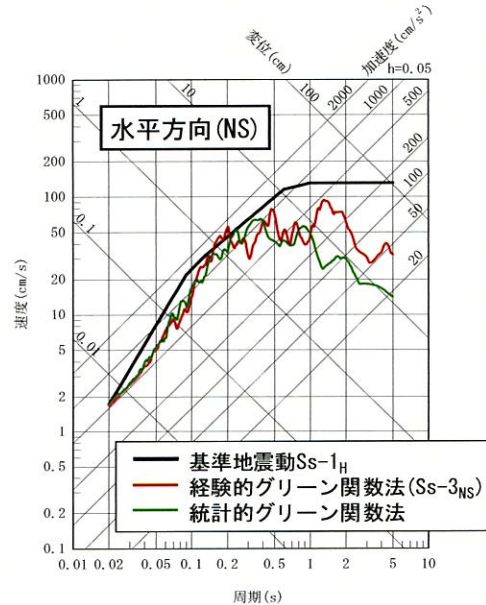
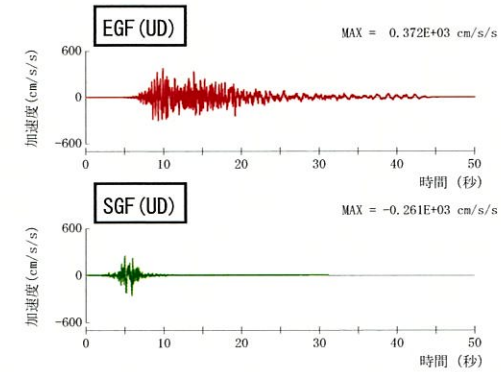
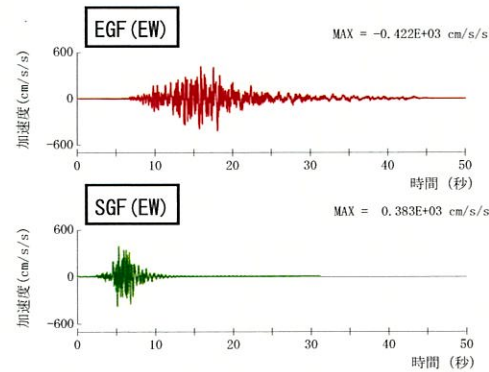
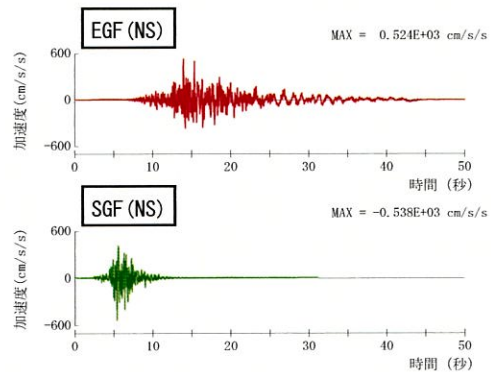
2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

統計的グリーン関数法による地震動評価

- 統計的グリーン関数法による地震動評価で用いる要素地震については、Boore(1983)⁴⁶⁾による理論スペクトルと佐藤(2004)⁴⁷⁾による経時特性を用いて、地震基盤における地震波を作成。
- 地震基盤における地震波を一次元波動論により、解放基盤波を作成。
- 上記の要素地震を用い、Dan et al.(1989)³⁰⁾により波形合成を行った。

第402回
審査会合資料

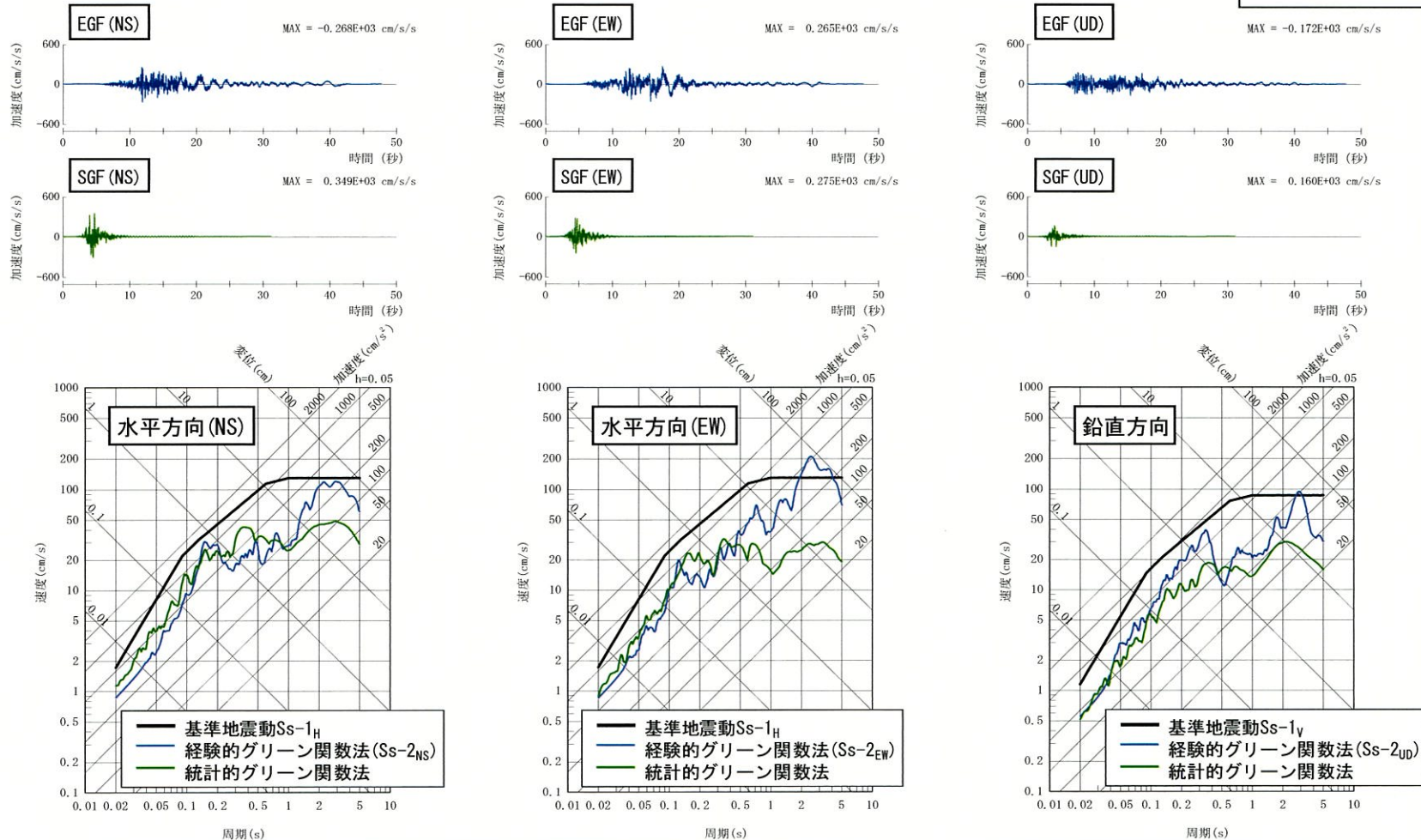
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

第402回
審査会合資料

「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース

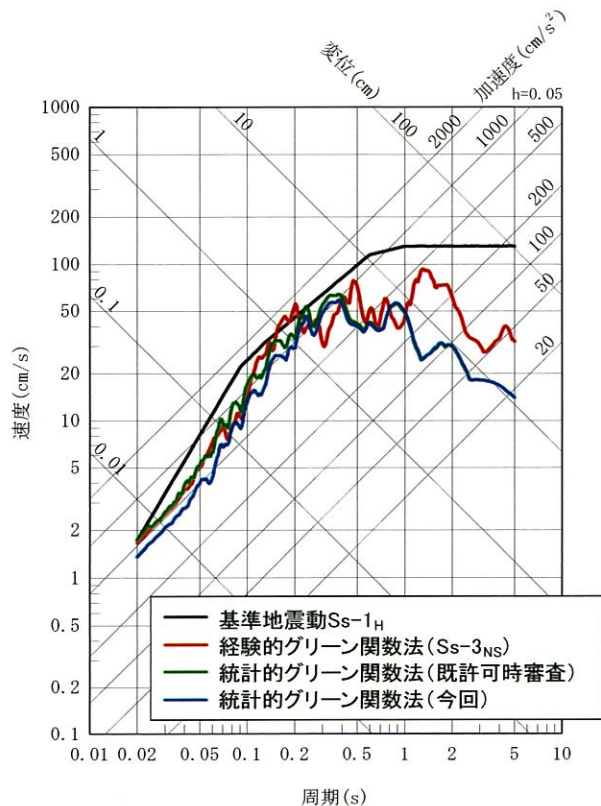


- P137に示した観測記録のフーリエ振幅スペクトルと理論スペクトルの傾向と同様、経験的グリーン関数法による評価結果は、低振動数側（長周期側）において、統計的グリーン関数法による評価結果を上回る。
- なお、統計的グリーン関数法による評価結果は、基準地震動Ss-1に包絡される結果となった。

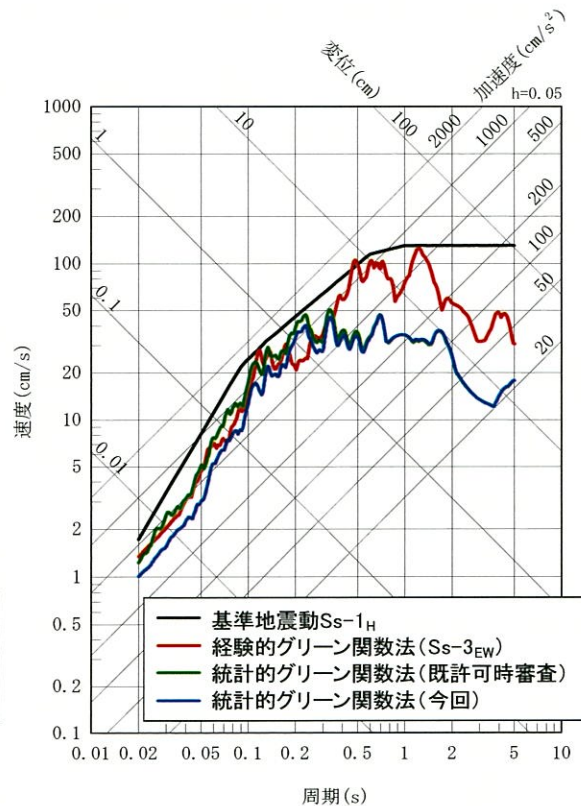
2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いて、再度、統計的グリーン関数法による地震動評価を実施した結果、既許可の統計的グリーン関数法による地震動評価結果と同等であり、既許可の経験的グリーン関数法による地震動評価結果の妥当性を再確認。
- 統計的グリーン関数法による再評価結果は、基準地震動 S_s-1 に包絡されることを確認。

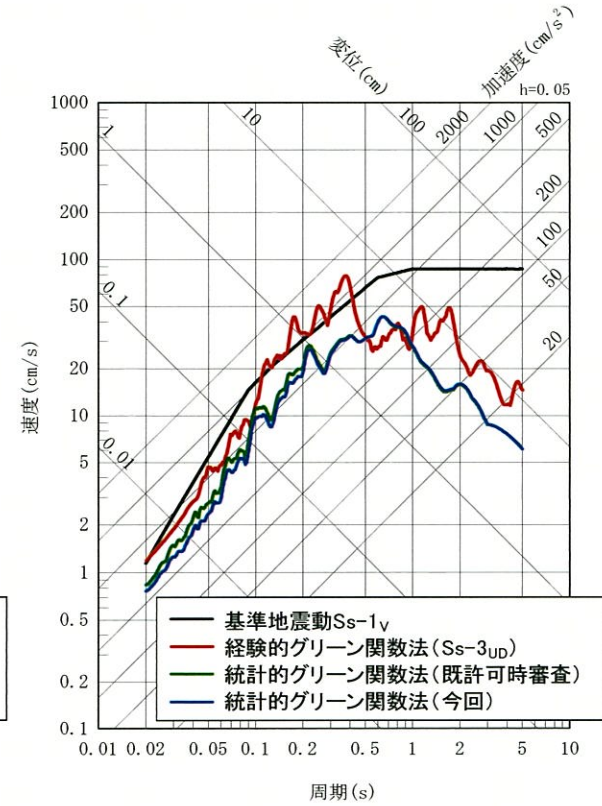
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



NS方向



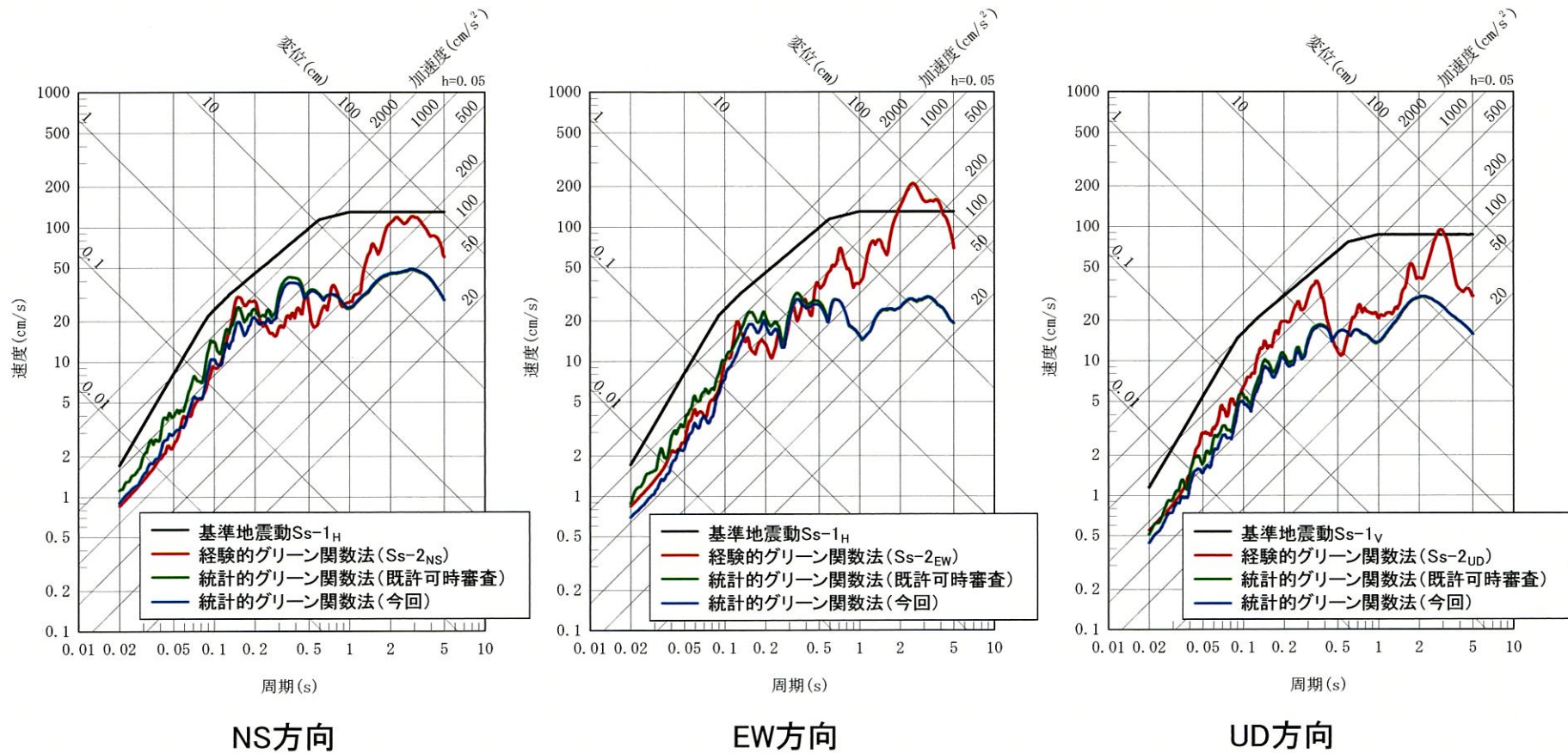
EW方向



UD方向

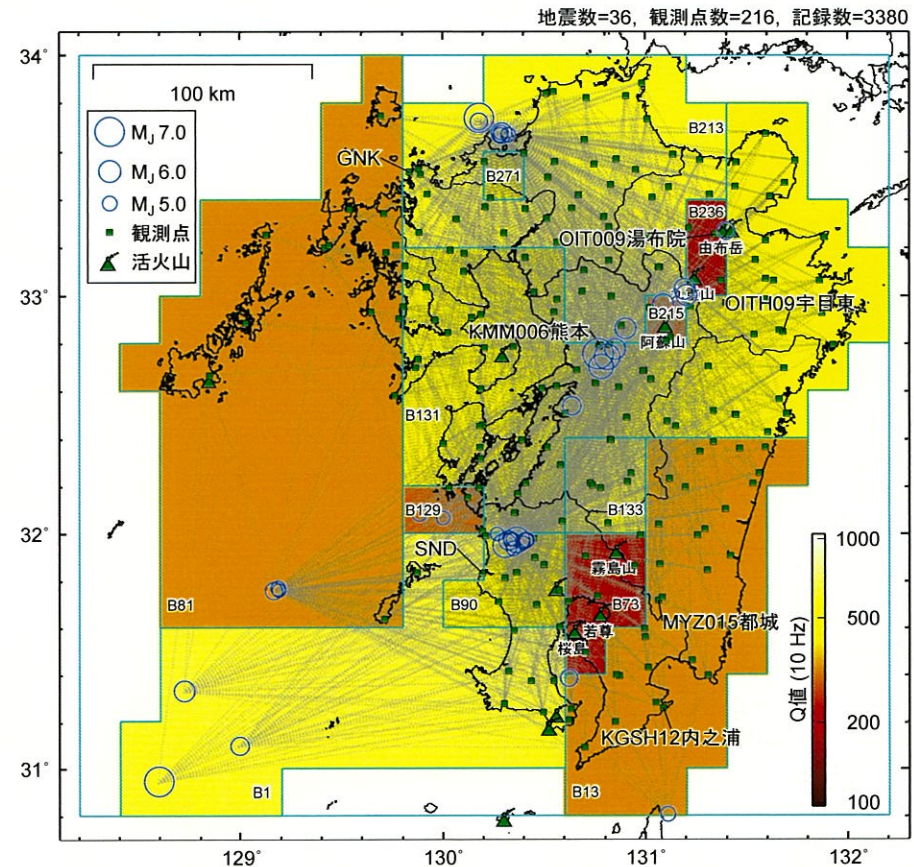
2. 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



【参考】友澤ほか(2019a)の概要

- 友澤ほか(2019b)⁷⁾は、火山帯周辺では伝播経路特性が複雑であることから、観測記録を震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性に分離する際には、伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することの重要性を指摘。
- 友澤ほか(2019a)^{5)、6)}は、九州地域で発生した地震の強震観測記録を収集し、九州地域の震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性をブロックインバージョン解析により推定。
- ブロックインバージョン解析は、友澤ほか(2019b)の手法を用いて、伝播経路特性の最適な領域分割とそれに基づく不均質構造を推定。
- 全領域で均質な減衰構造を仮定した手法と本手法の回帰残差の分析を実施し、減衰構造の不均質性を考慮することの利点を定量的に評価。

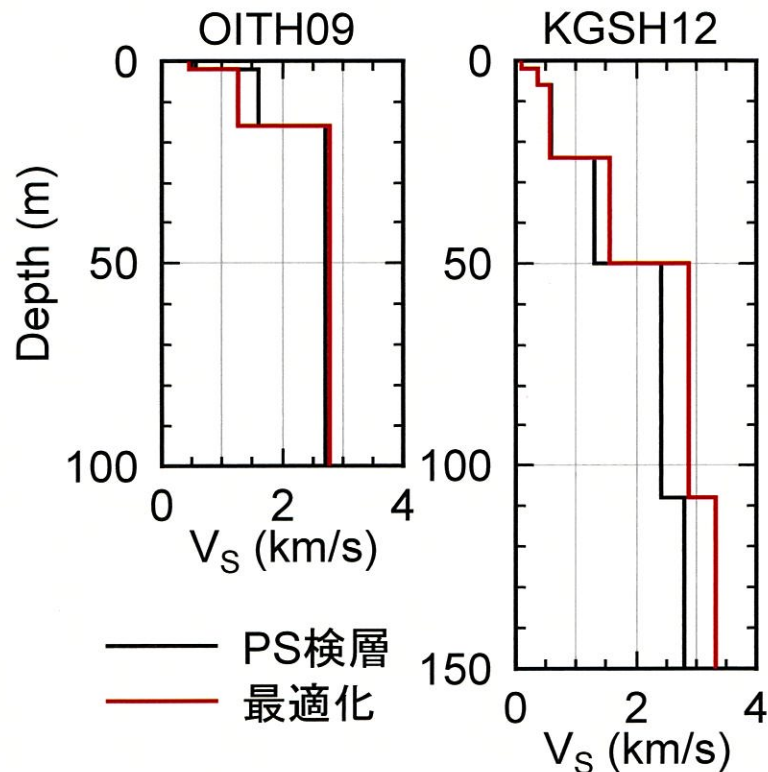


検討に用いたデータセットと推定した不均質減衰構造

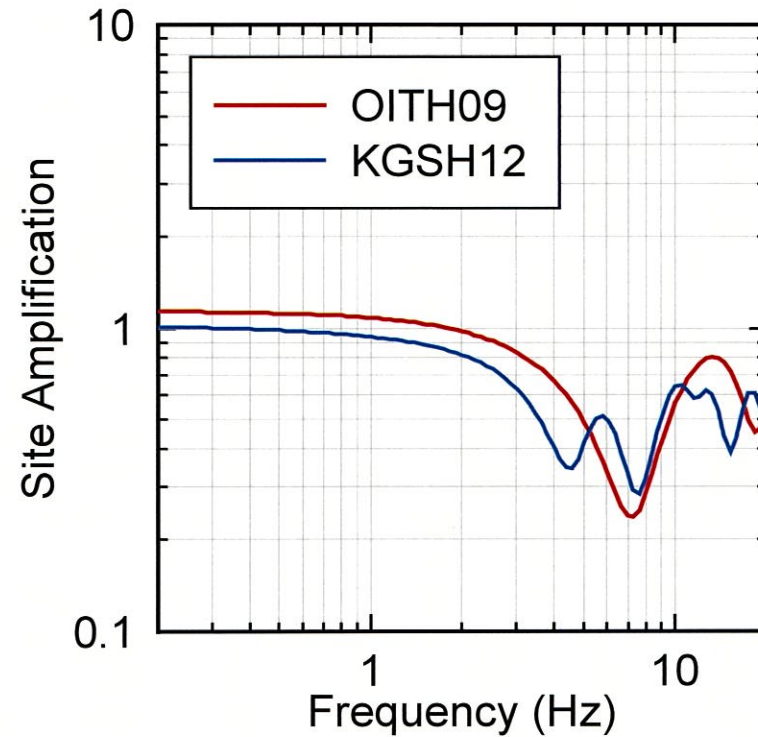
友澤ほか(2019a)

【参考】友澤ほか(2019a)の概要

- KiK-net宇目東 (OITH09) とKiK-net内之浦 (KGS12) の2観測点を基準観測点として選定し、その理論増幅特性を拘束条件として震源特性とサイト増幅特性のトレードオフを解消。
- 笠松ほか(2014)⁹⁾の最適化地盤モデルによると、これらの基準観測点の地中観測点位置は、地震基盤と見なせるため、基準観測点に適していると判断。



基準観測点の地盤モデル



基準観測点の理論増幅率

友澤ほか(2019a)

【参考】友澤ほか(2019a)の概要

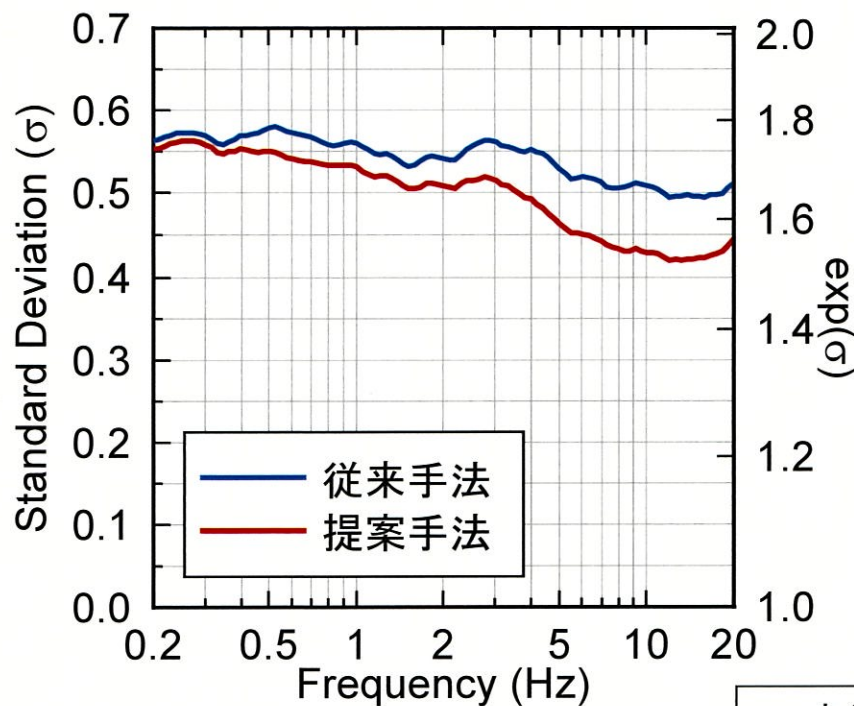
- 本検討では、友澤ほか(2019b)⁷⁾の手法を用いて、伝播経路の領域をJ個に分割して、 m 地震、 n 観測点の観測記録の加速度フーリエ振幅スペクトル $F_{mn}(f)$ を(1)式でモデル化。

$$F_{mn}(f) = \frac{\pi f^2 R_{\theta\phi} F_s}{\rho \beta^3} S_m(f) \frac{1}{(x_{mn})^\gamma} \prod_{j=1}^J \exp\left(-\frac{\pi x_{mnj} f}{Q_j(f) \bar{\beta}}\right) G_n(f) \quad (1)$$

- $S_m(f)$: m 地震の震源スペクトル
 $G_n(f)$: n 観測点のサイト特性
 x_{mnj} : j 番目の領域の伝播距離
 $Q_j(f)$: j 番目の領域の Q 値
 $R_{\theta\phi}$: 震源放射特性係数 (=0.63)
 F_s : 自由表面による増幅 (=2)
 ρ : 震源媒質密度 (=2.7g/cm³)
 β : 震源媒質 S 波速度 (=3.4km/s)
 $\bar{\beta}$: 伝播経路の平均 S 波速度 (3.4km/s)
 γ : 幾何減衰項

【参考】友澤ほか(2019a)の概要

- 全領域で均質な減衰構造を仮定してスペクトルインバージョン解析を行った場合（従来手法）と、本手法により減衰構造に不均質性を考慮した場合（本手法）の回帰残差の標準偏差を比較。
- 伝播経路特性のモデル化に不均質性を考慮することにより、特に高周波数側ではばらつきの値が最大15%低減。



残差の標準偏差の比較

友澤ほか(2019a)

参考文献

- 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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 友澤裕介、加藤研一、塩田哲生(2020): 伊予灘周辺で発生した地震に基づく震源特性・不均質伝播経路特性・サイト増幅特性の推定-フィリピン海プレート形状を考慮したブロックインバージョン解析-、日本地震工学会論文集、第20巻、第7号、120-132、2020年11月。
- 9) 笠松健太郎、池浦友則、岡崎敦: 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。