

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の確認結果

2021年6月18日
九州電力株式会社

余 白

1. 改正基準の概要
2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の概要
3. 地下構造モデルの設定
4. 地震基盤相当面の設定
5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成
6. 解放基盤表面における地震動の設定
7. 現行の基準地震動との比較

【参考1】 仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

【参考2】 複数の方法による模擬地震波の検討

【参考3】 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

1. 改正基準の概要

- 「実用発電用原子炉及びその付属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（別記2）」の改正（令和3年4月21日原子力規制委員会決定）の概要

（別記2）

第4条第5項第三号

上記の「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連付けることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を基に、各種の不確かさを考慮して敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定すること。
なお、上記の「震源を特定せず策定する地震動」については、次に示す方針により策定すること。

- ① 上記の「震源を特定せず策定する地震動」の策定に当たっては、「全国共通に考慮すべき地震動」及び「地域性を考慮する地震動」の2種類を検討対象とすること。
- ② 上記の「全国共通に考慮すべき地震動」の策定に当たっては、震源近傍における観測記録を基に得られた次の知見をすべて用いること。
 - ・ 2004年北海道留萌支庁南部の地震において、防災科学技術研究所が運用する全国強震観測網の港町観測点における観測記録から推定した基盤地震動
 - ・ 震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s = 2200\text{ m/s}$ 以上の地層をいう。）における標準的な応答スペクトル（以下「標準応答スペクトル」という。）として次の図に示すもの

つづく

1. 改正基準の概要

つづき

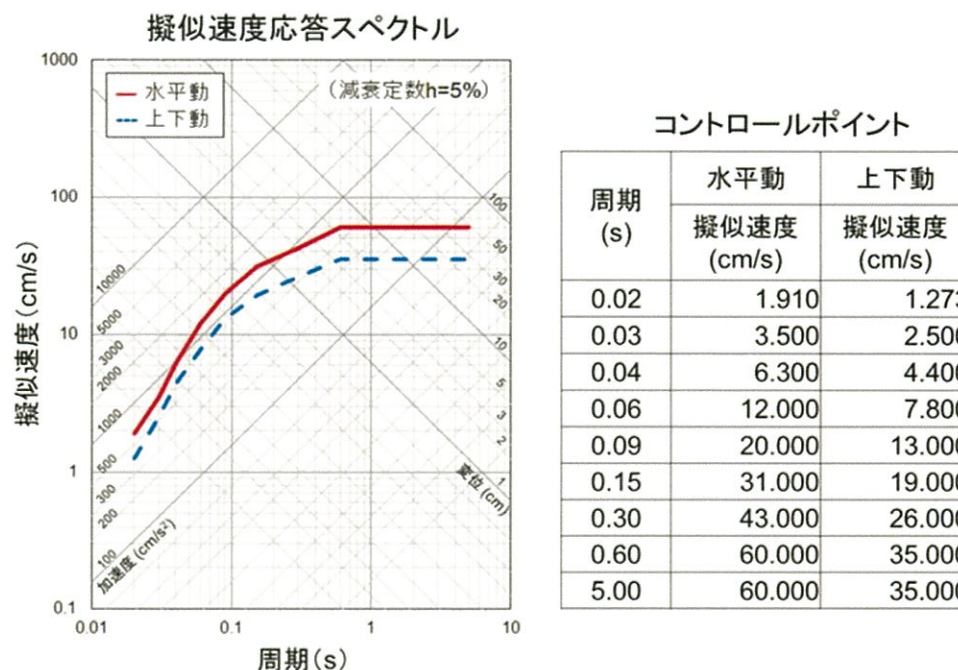


図 地震基盤相当面における標準応答スペクトル

- ③ 上記の「地域性を考慮する地震動」の検討の結果、この地震動を策定する場合にあっては、事前に活断層の存在が指摘されていなかった地域において発生し、地表付近に一部の痕跡が確認された地震について、震源近傍における観測記録を用いること。
- ④ 解放基盤表面までの地震波の伝播特性を必要に応じて応答スペクトルの設定に反映するとともに、設定された応答スペクトルに対して、地震動の継続時間及び経時的变化等の特性を適切に考慮すること。
- ⑤ 上記の「震源を特定せず策定する地震動」について策定された基準地震動の妥当性については、最新の科学的・技術的知見を踏まえて個別に確認すること。

1. 改正基準の概要

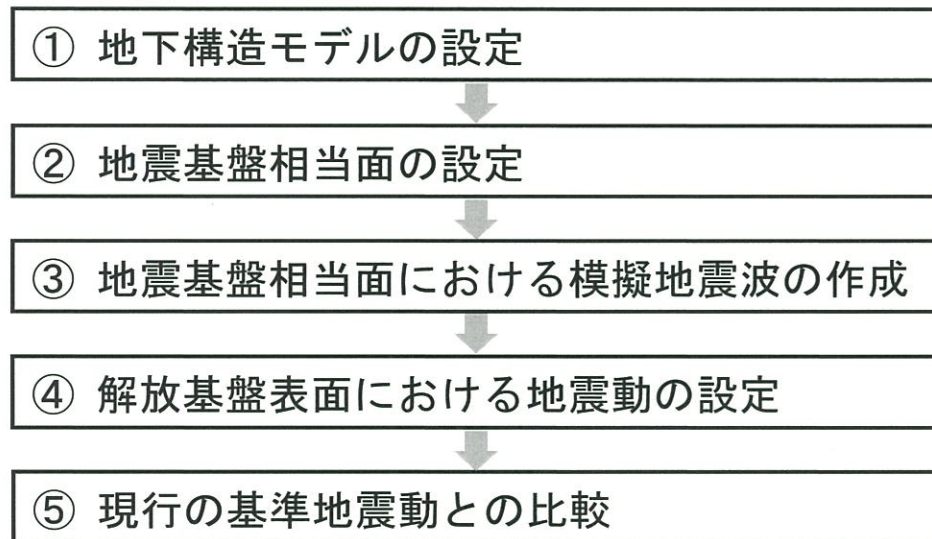
現行の基準地震動（平成29年1月18日許可）の最大加速度

(単位：cm/s²)

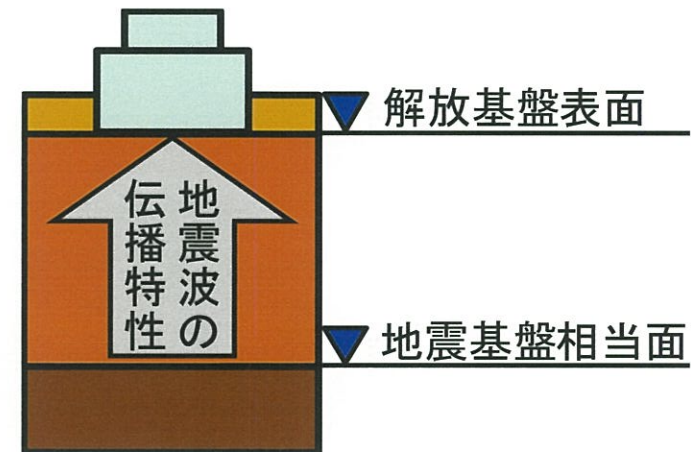
敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540		360
断層モデルを用いた手法	城山南断層	Ss-2	268	265	172
	竹木場断層	Ss-3	524	422	372
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
全国共通で考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-4	620		320
	標準応答スペクトル	今回検討			
地域性を考慮する地震動 (Mw6.5程度以上)	鳥取県西部地震	Ss-5	528	531	485

2. 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価の概要

- 以下の流れで、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定し、現行の基準地震動（Ss-1～Ss-5）の応答スペクトルとの比較を実施。



標準応答スペクトルを考慮した地震動
の評価の流れ



標準応答スペクトルを考慮した地震動
の評価のイメージ

3. 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

3. 地下構造モデルの設定

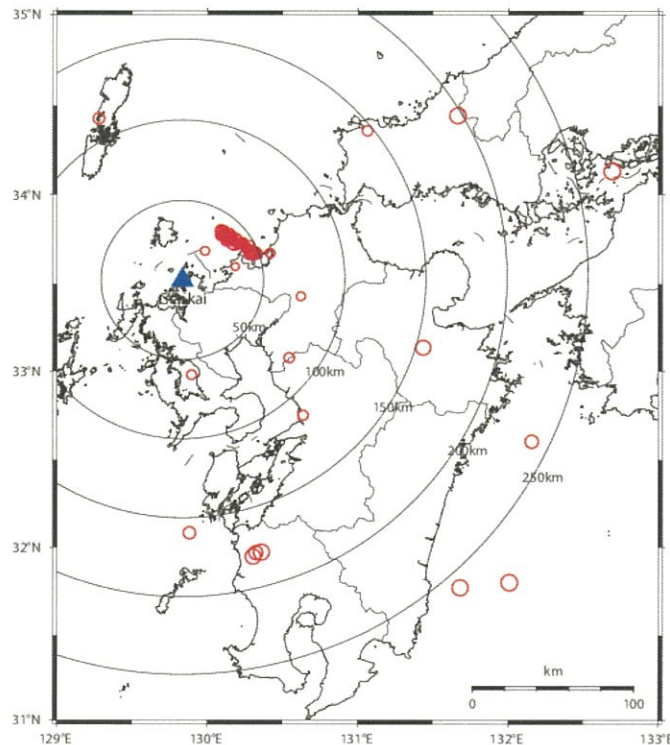
- 既許可（平成29年1月18日許可）以降、更なる安全性・信頼性の向上を目的に、継続的に敷地地盤における地震観測を実施するとともに、最新の技術的知見やデータの取得に努めてきた。
- これらの既許可以降に取得した地震観測記録や最新の技術的知見等も含めた多面的な検討により、地下構造モデルを精緻化。
- なお、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価では、短周期側も対象とした地盤減衰の設定が必要。
- 次頁以降で以下の検討及び検証を行い、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを設定。
 - ① 敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び検証
 - ・ 伝達関数による検討
 - ・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

3. 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

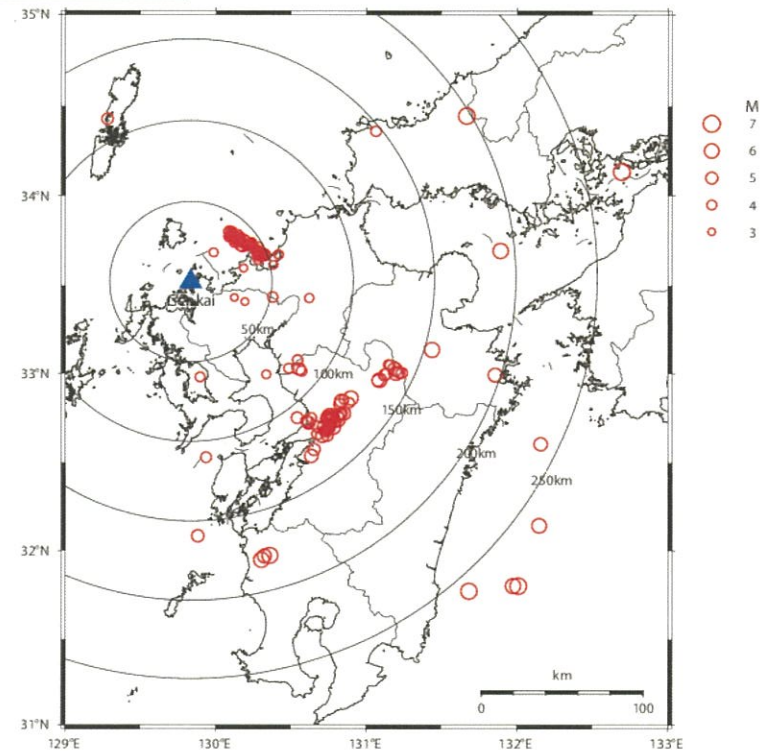
- 既許可時審査以降、玄海原子力発電所の敷地地盤における鉛直アレイによる地震観測を継続して実施しており、新たに、2016年熊本地震を含む79地震の観測記録を取得。
(計155地震の観測記録)
- これらの地震観測記録を用いて、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの地盤減衰の検討を実施。

計76地震



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155地震

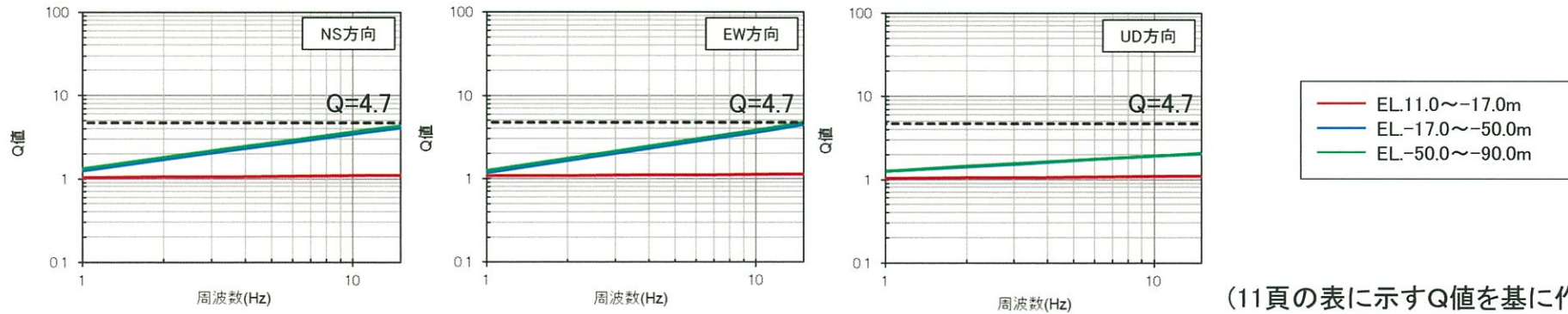


敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

3. 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（11、12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。



(11頁の表に示すQ値を基に作図)

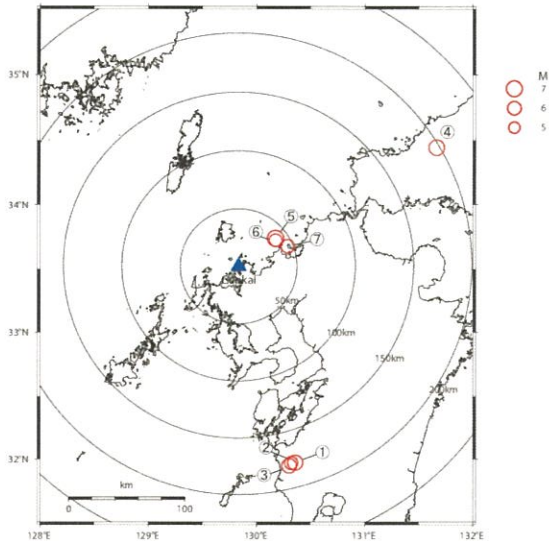
伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)

3. 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

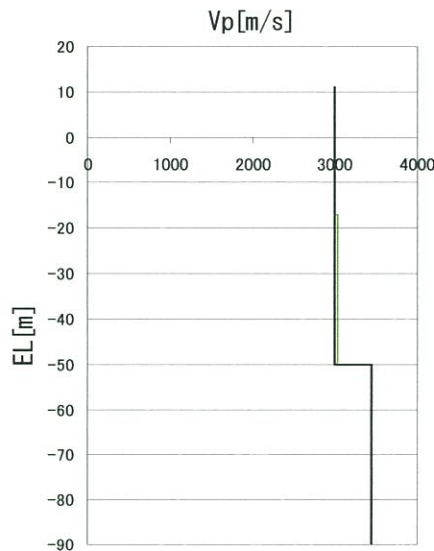
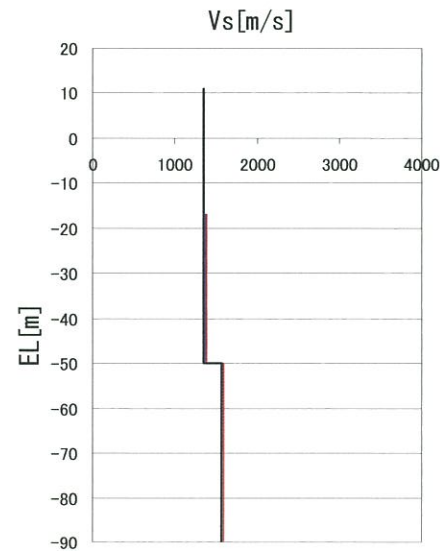
$$\ast Q(f) = Q_0 \cdot f^\alpha$$

3. 地下構造モデルの設定

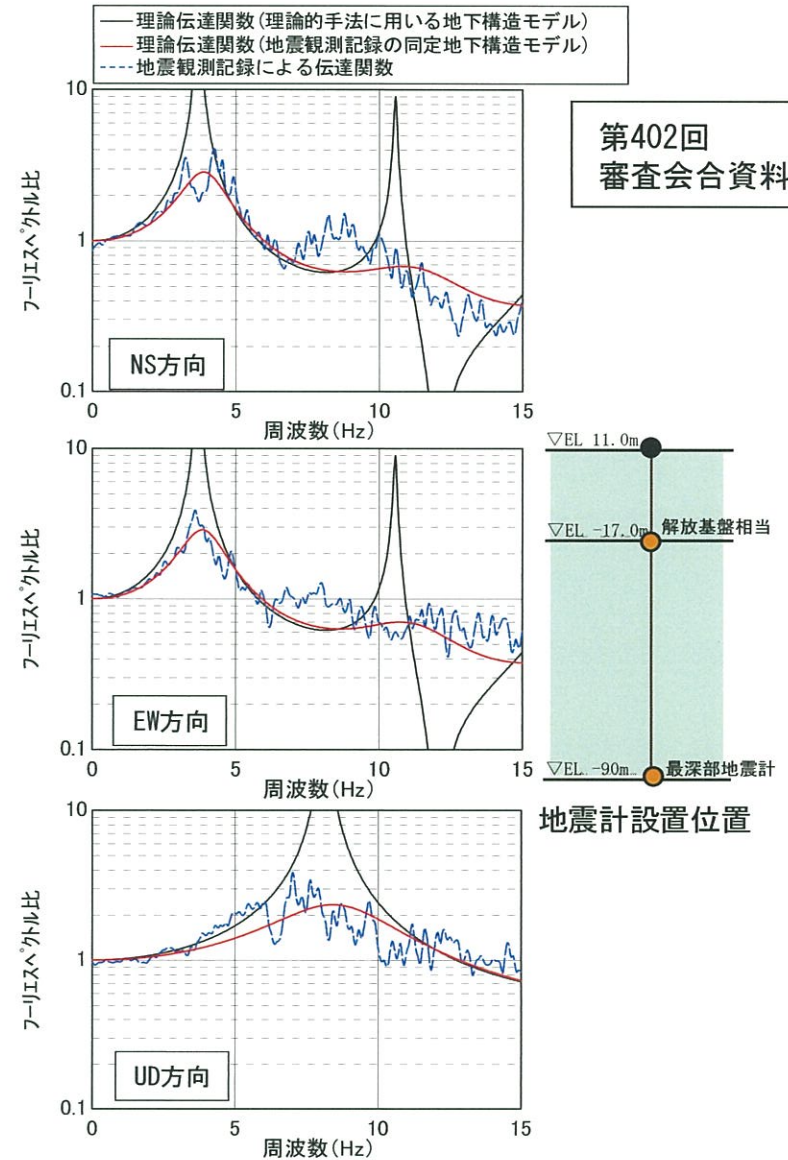
- ・ 主な7地震の地震観測記録を用いて同定された地盤の速度構造から算出される伝達関数は、地震観測記録の伝達関数と整合する。
- ・ 同定された地盤の速度構造は、基準地震動策定において、長周期側の理論的手法による地震動評価に用いる地下構造モデルの速度構造と整合することを確認した。

— : 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



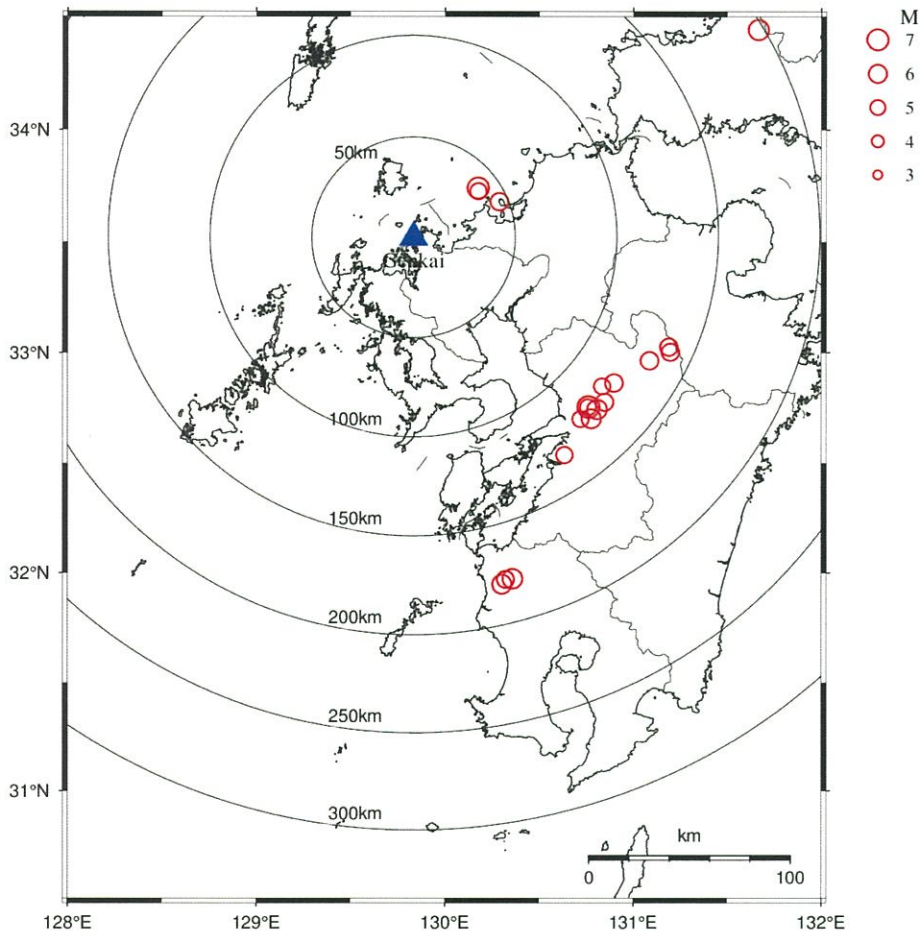
第402回
 審査会合資料

地震計設置位置

伝達関数 (EL. -17m/EL. -90m) の比較

3. 地下構造モデルの設定

- 既許可時審査と同様の観点（M5.4以上、震央距離200km以内）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。



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)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132

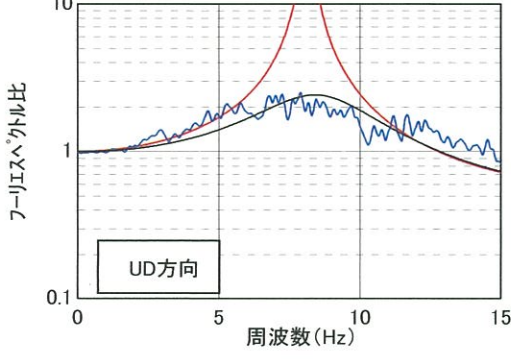
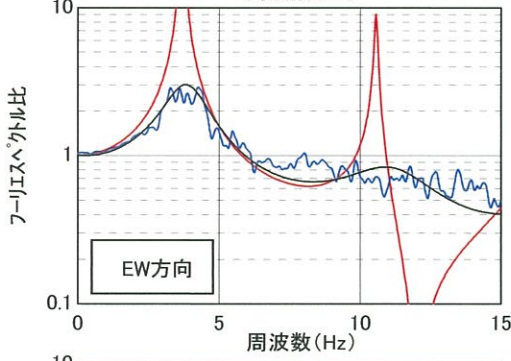
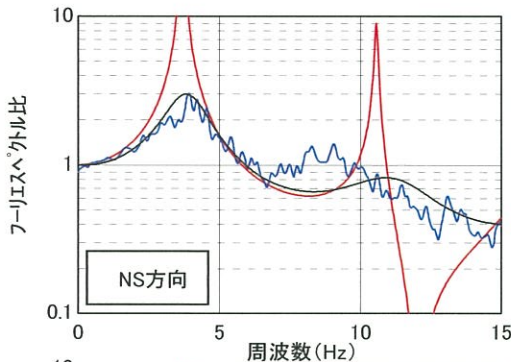
既許可時審査
↑
↓
今回新たに追加

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)

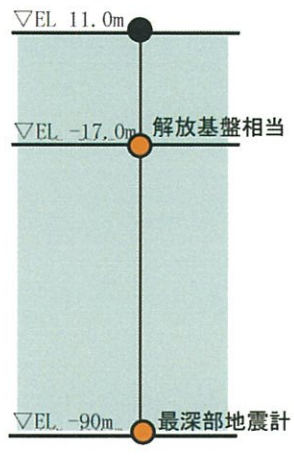
3. 地下構造モデルの設定

- 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)



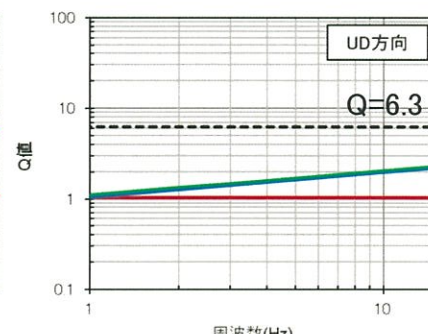
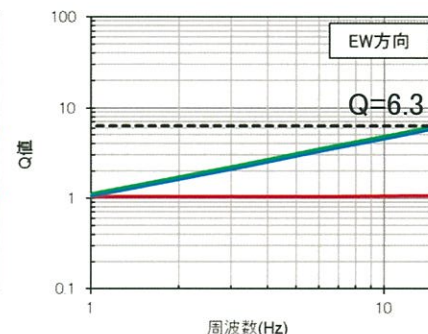
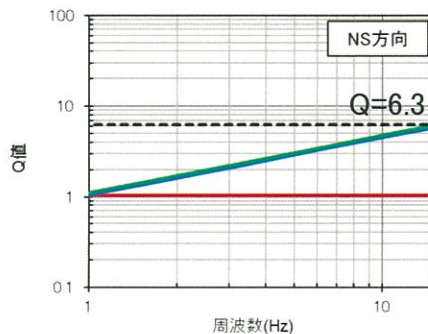
地震計設置位置

地下構造モデル (既許可)

層	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)
0	2.35	1350	3000
1	2.35	1350	3000
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

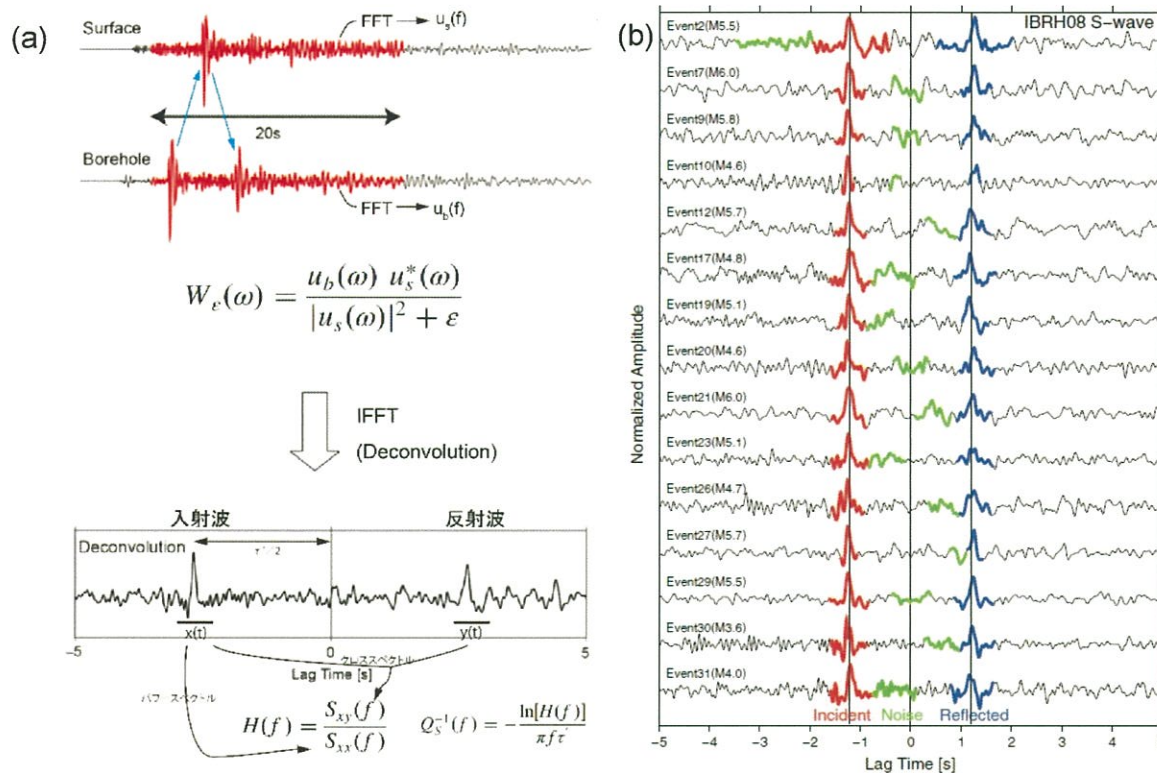


伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)

3. 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^{1),2)}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。



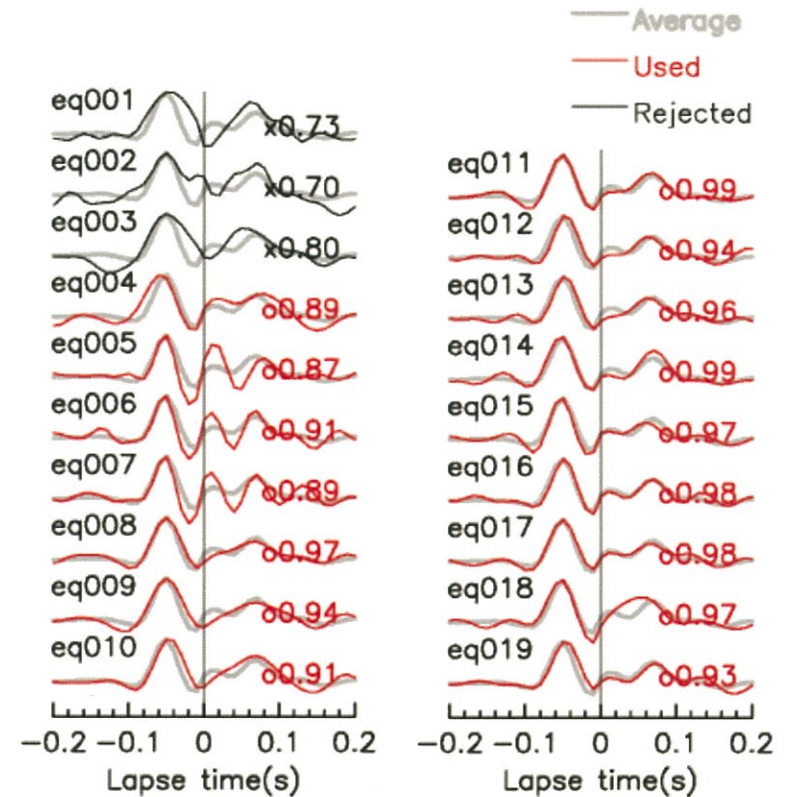
Fukushima et al.(2016)
(一部加筆)

3. 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)³⁾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)

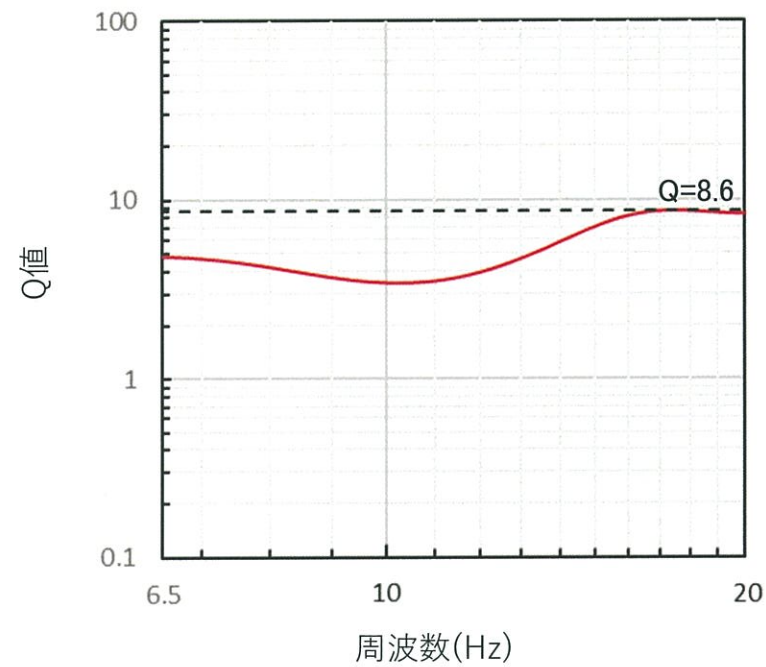
番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)
①	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	178
②	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	178
③	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	179
④	山口県	1997年6月25日	6.6	198
⑤	九州北西沖	2005年3月20日	7.0	40
⑥	九州北西沖	2005年3月22日	5.4	39
⑦	福岡県中部	2005年4月20日	5.8	46
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	125
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	126
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	126
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	121
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	121
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	123
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	132
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	138
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	119
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	123
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	140
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	132



全地震の波形の平均と各地震の波形の相関

3. 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。

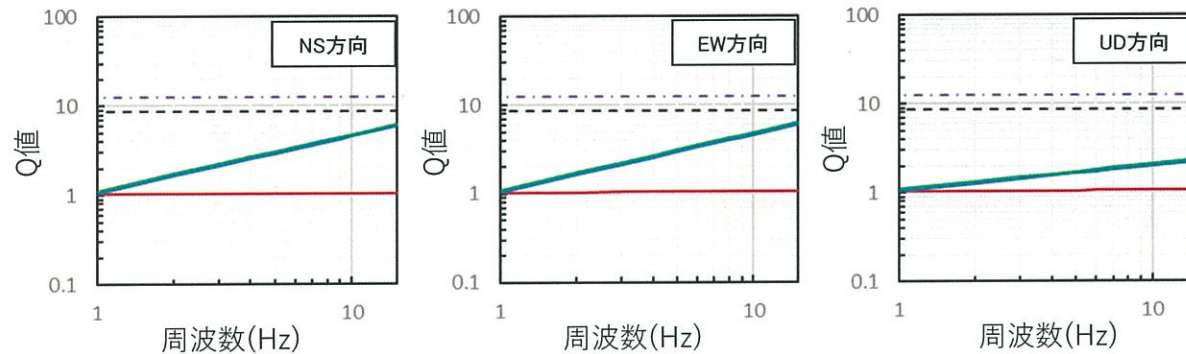
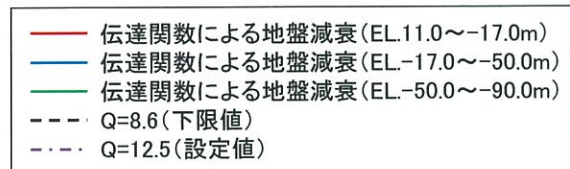


地震波干渉法により同定された地盤減衰
(EL.11m~EL.-90m)

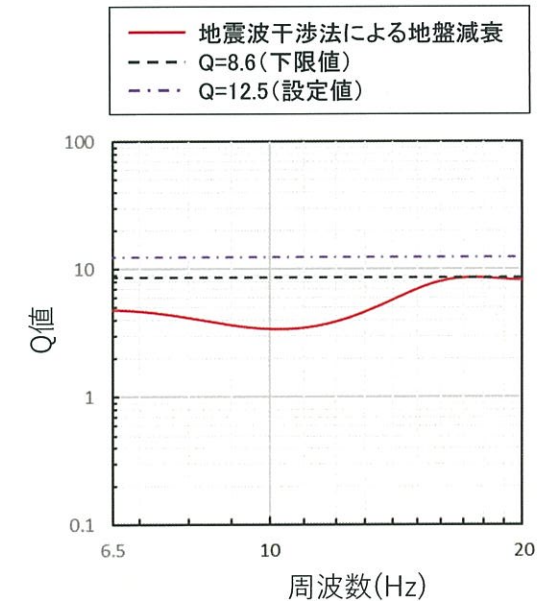
3. 地下構造モデルの設定

地盤減衰 (Q値) の設定

- 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。
- 地盤減衰の不確かさを考慮し、鉛直アレイ地震観測記録に基づく地盤減衰を $Q=12.5$ と設定。



伝達関数により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)



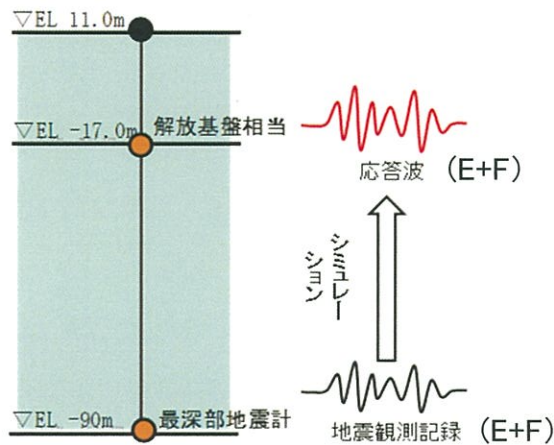
地震波干渉法により同定された地盤減衰(EL.+11m~EL.-90m)

3. 地下構造モデルの設定

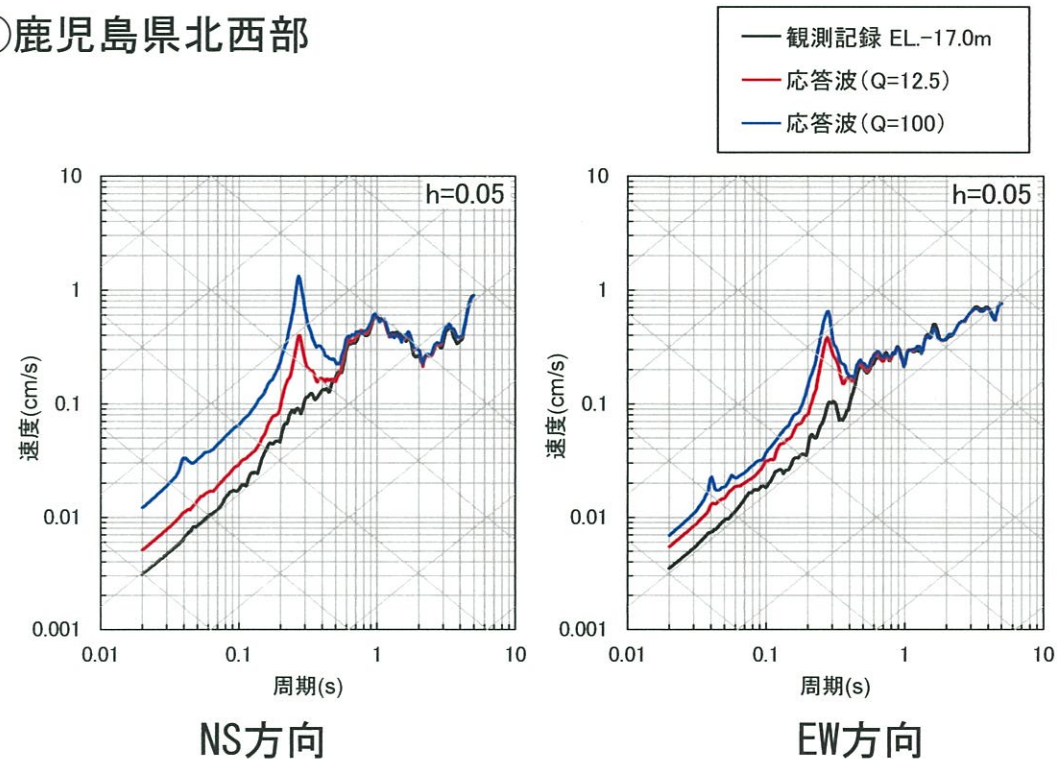
応答スペクトルによる検証

- 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大きい傾向。

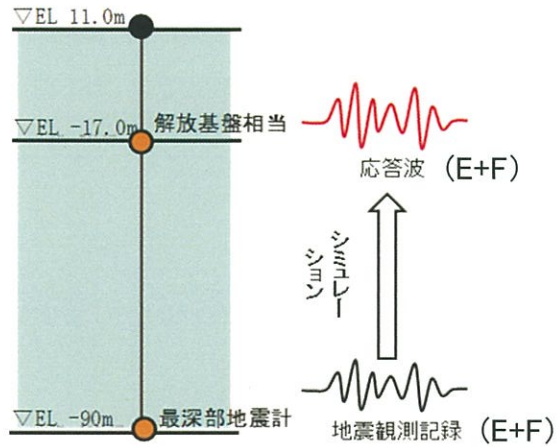
① 鹿児島県北西部



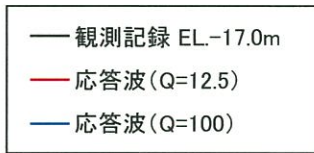
検証のイメージ



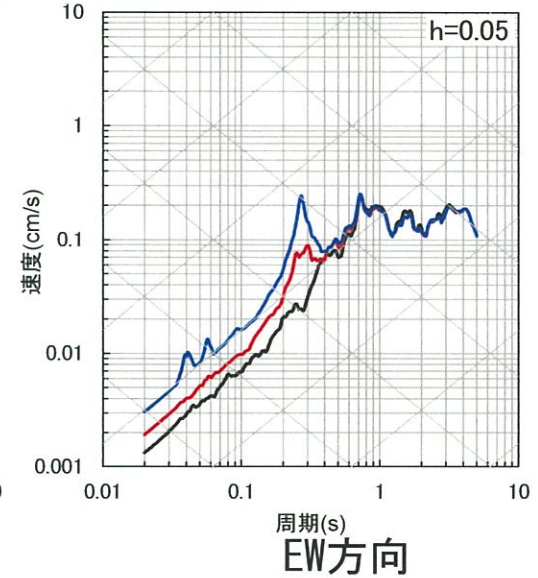
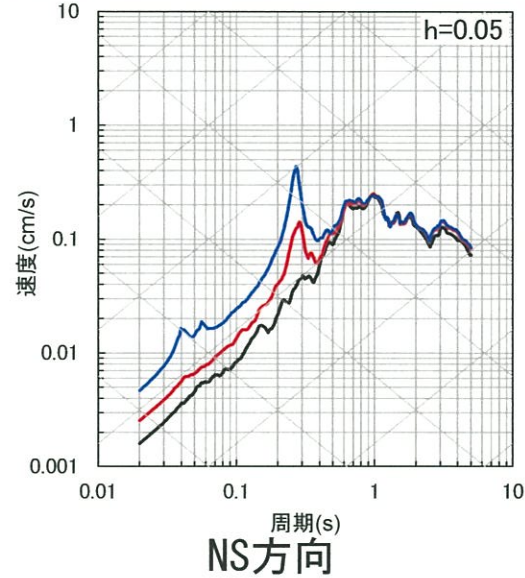
3. 地下構造モデルの設定



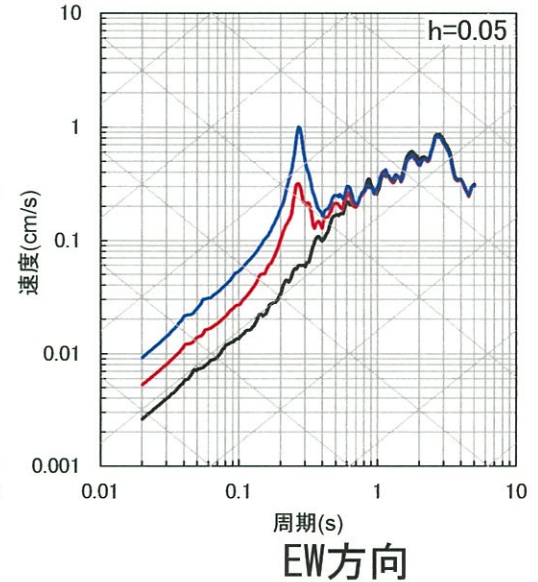
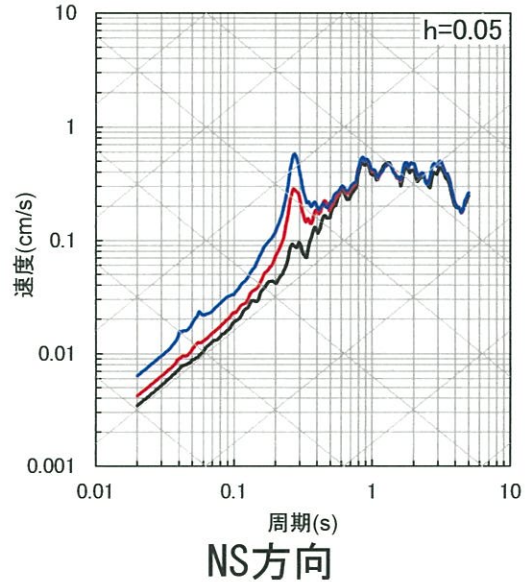
検証のイメージ



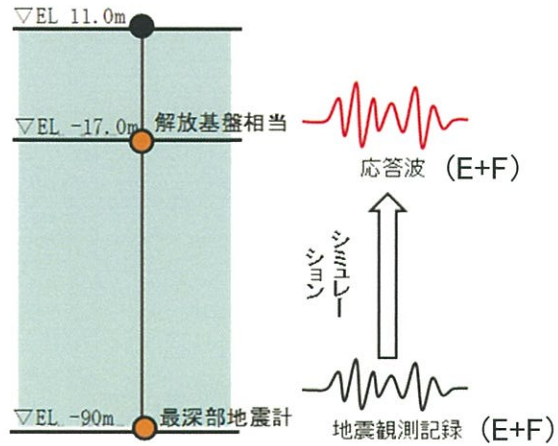
② 鹿児島県北西部



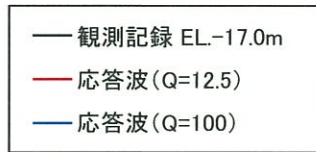
③ 鹿児島県北西部



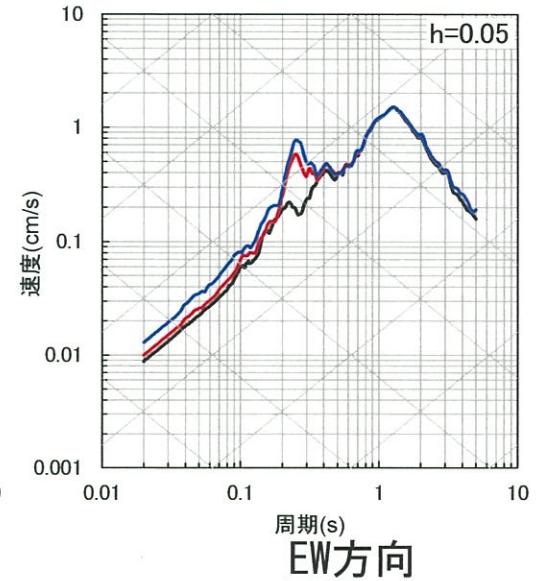
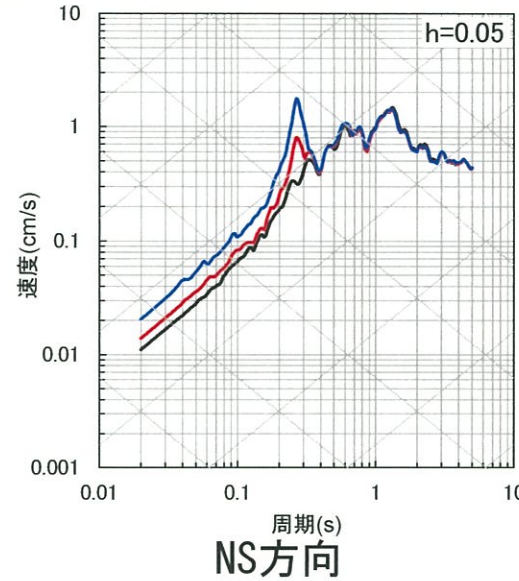
3. 地下構造モデルの設定



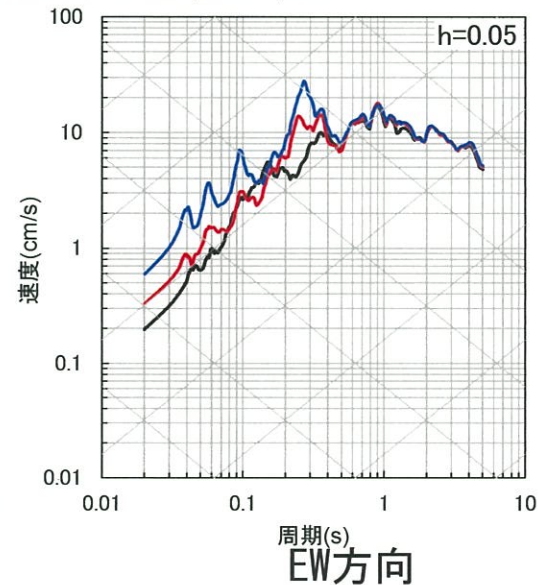
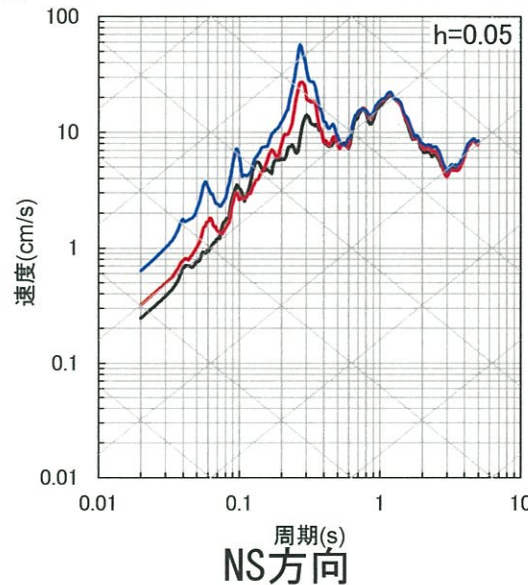
検証のイメージ



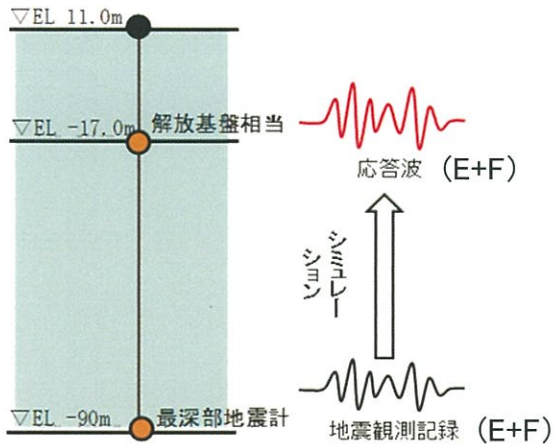
④山口県



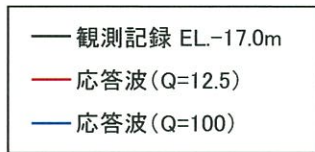
⑤九州北西沖（2005年福岡県西方沖地震本震）



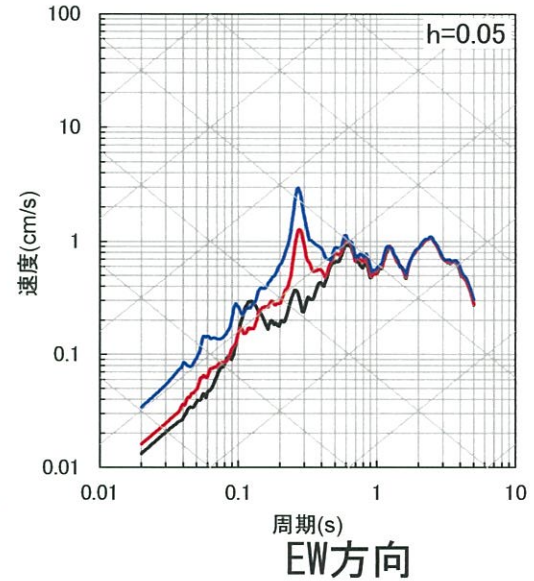
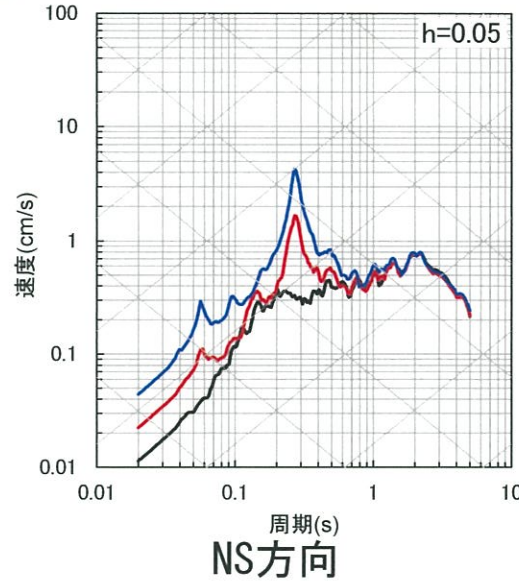
3. 地下構造モデルの設定



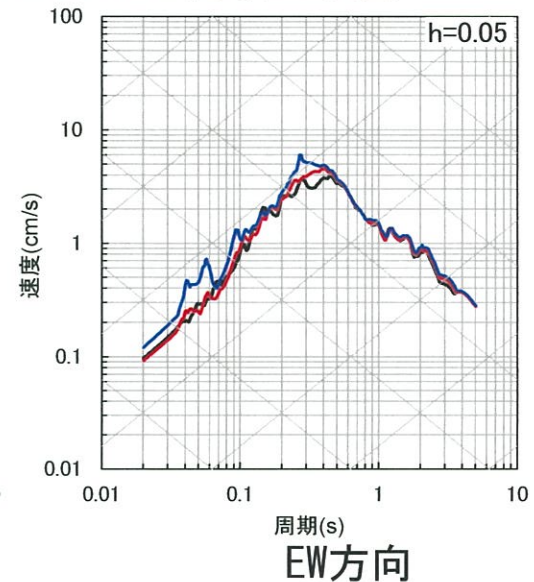
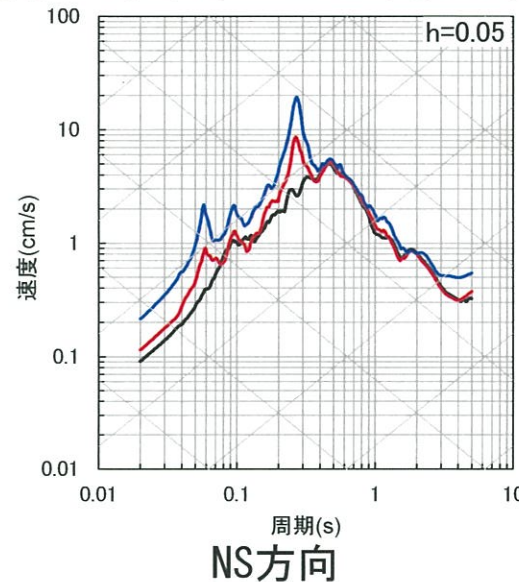
検証のイメージ



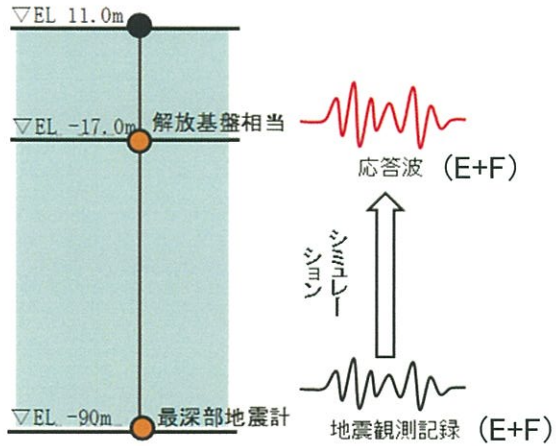
⑥九州北西沖



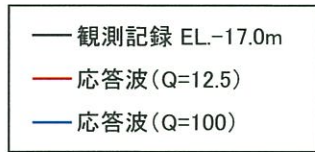
⑦福岡県中部 (2005年福岡県西方沖地震最大余震)



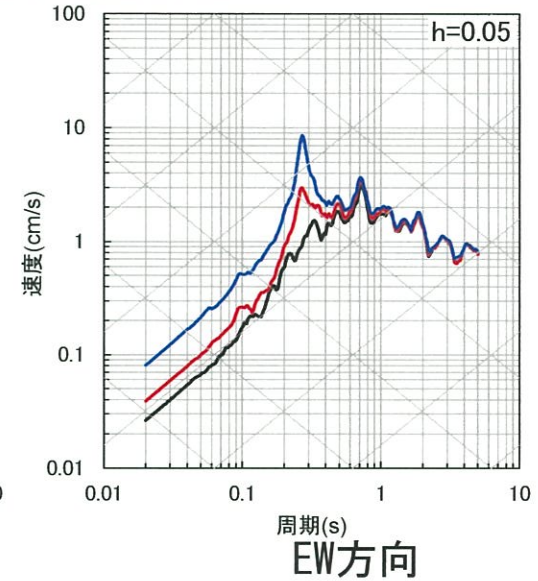
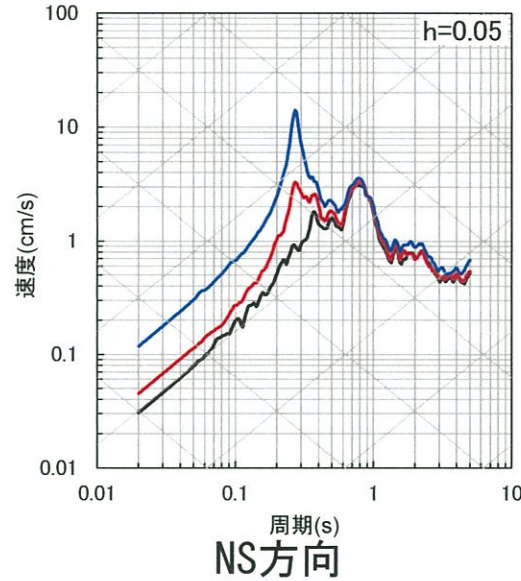
3. 地下構造モデルの設定



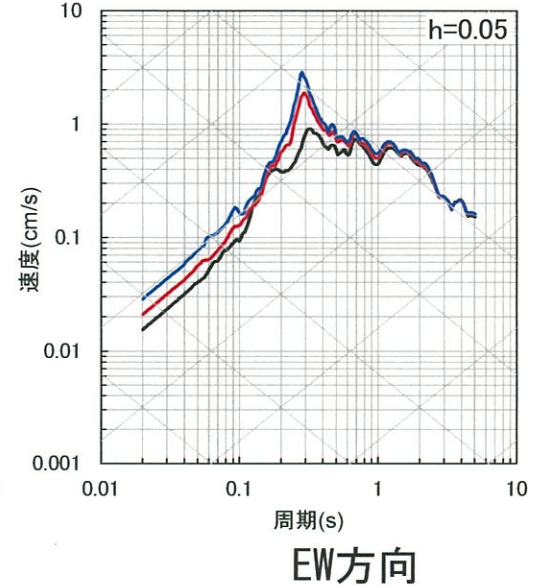
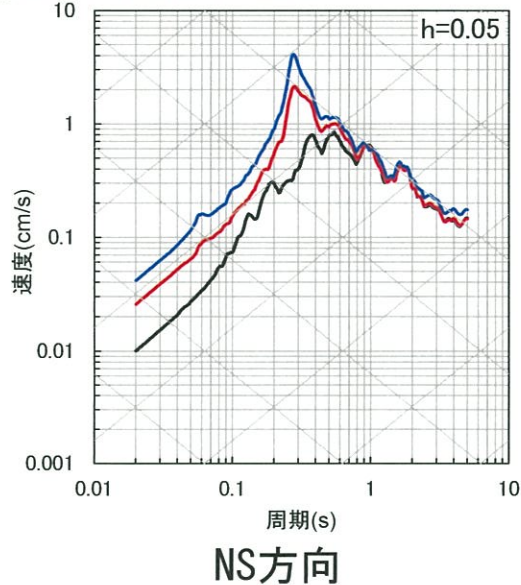
検証のイメージ



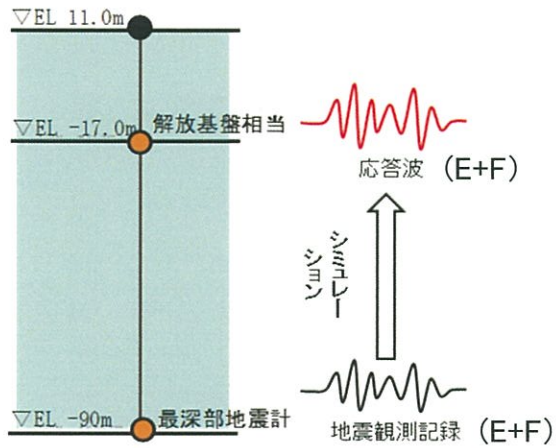
⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)



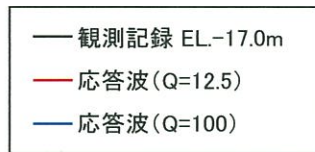
⑨熊本県熊本地方



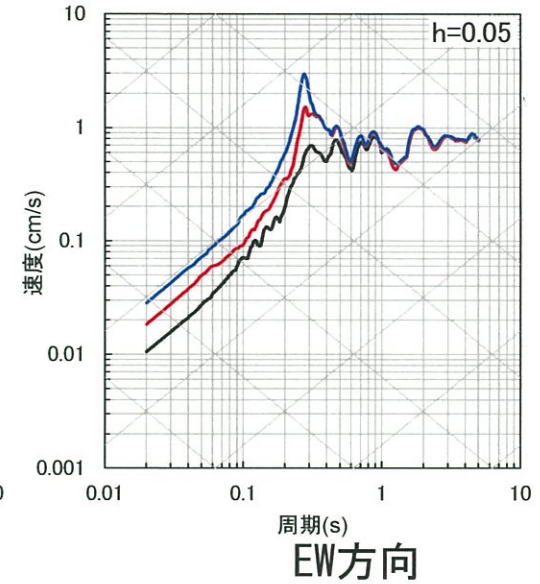
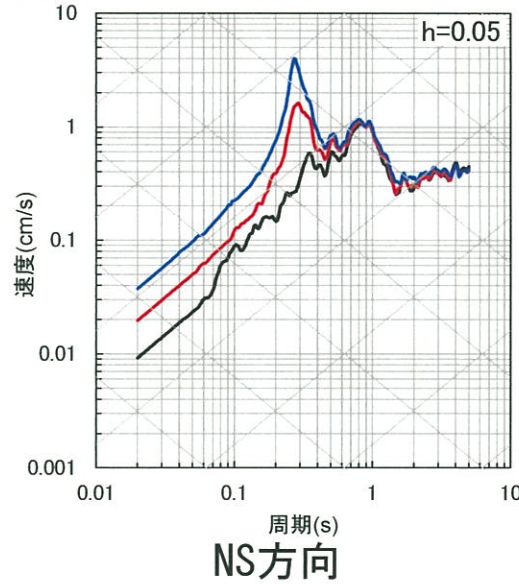
3. 地下構造モデルの設定



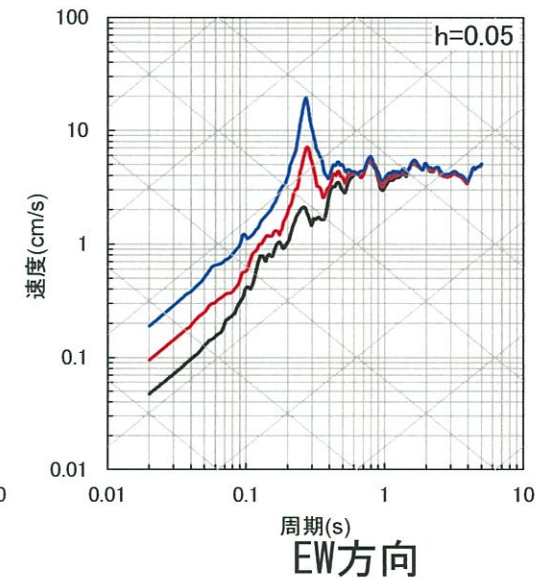
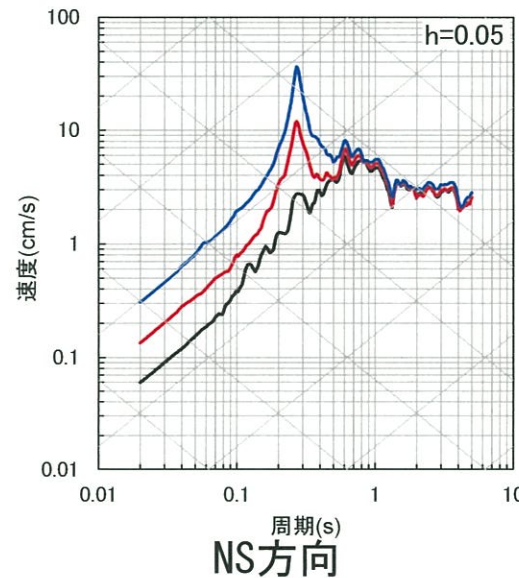
検証のイメージ



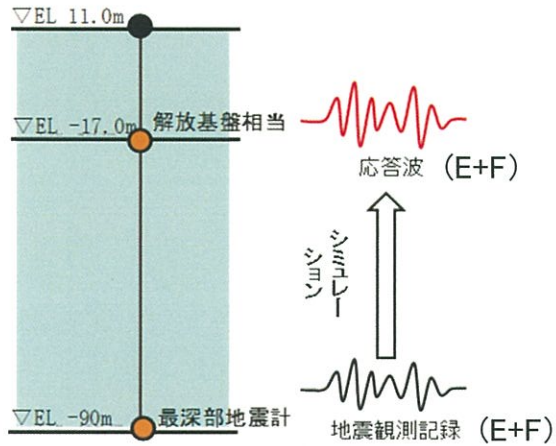
⑩熊本県熊本地方



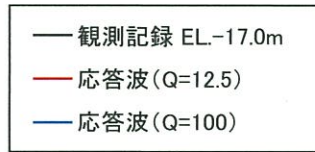
⑪熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)



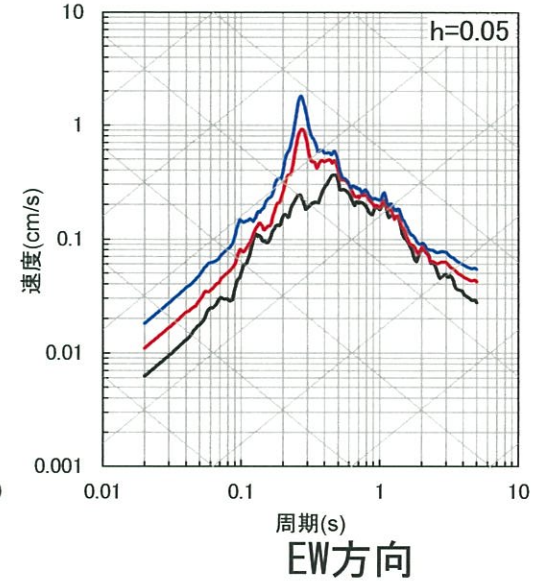
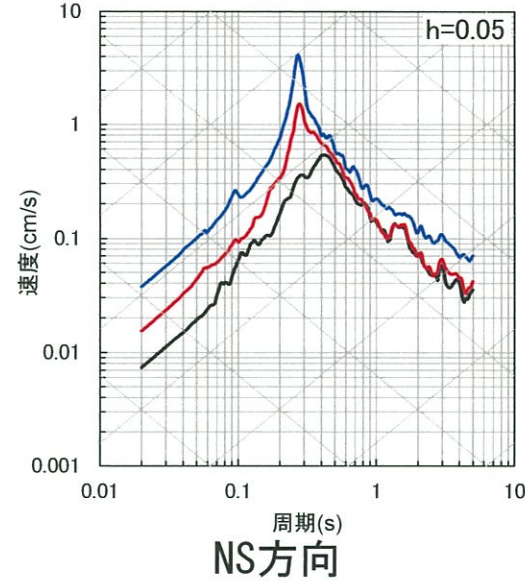
3. 地下構造モデルの設定



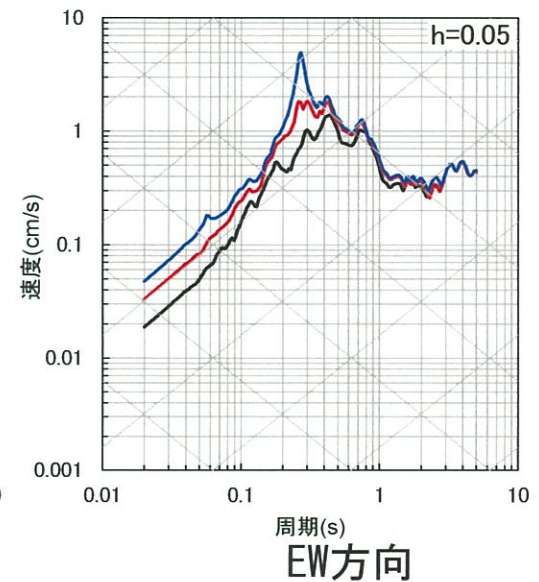
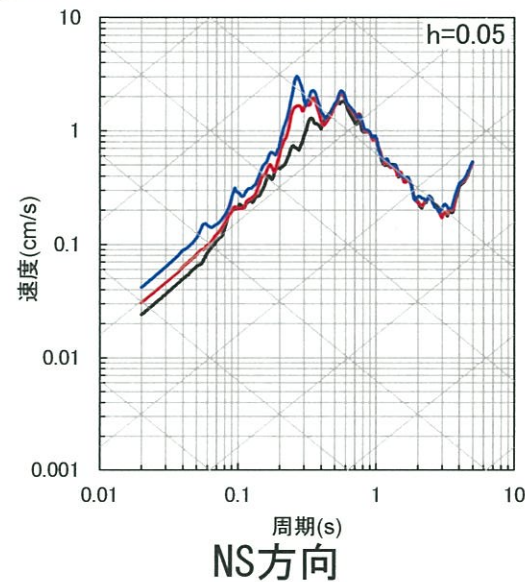
検証のイメージ



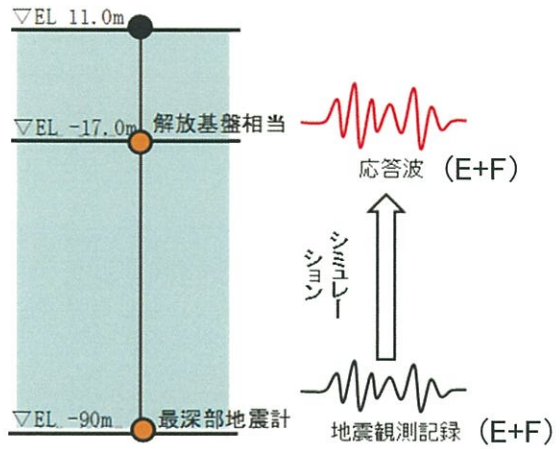
⑫ 熊本県熊本地方



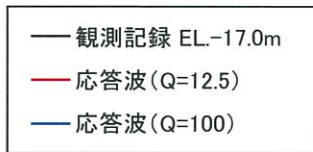
⑬ 熊本県熊本地方



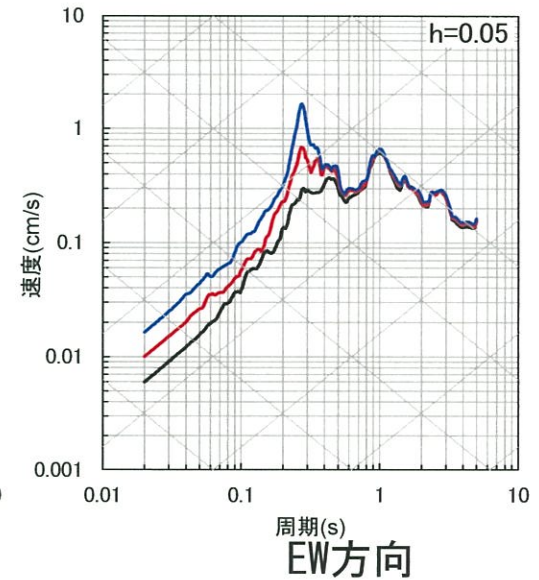
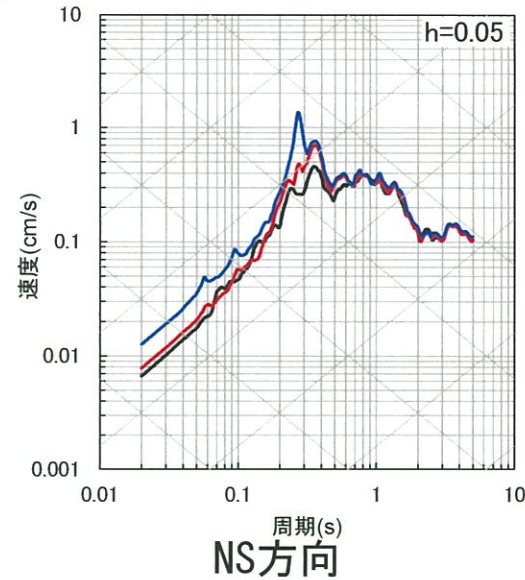
3. 地下構造モデルの設定



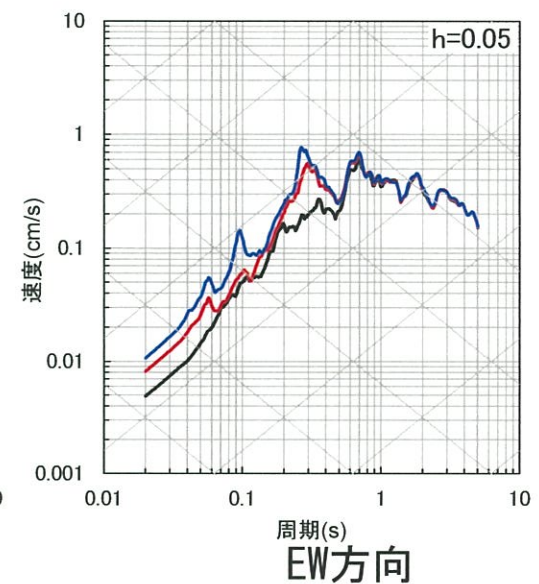
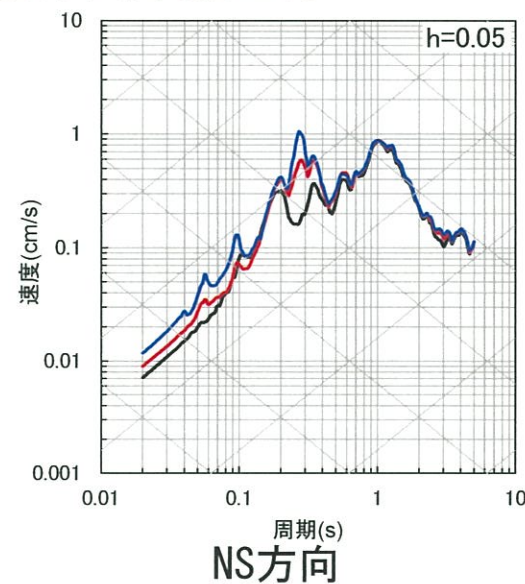
検証のイメージ



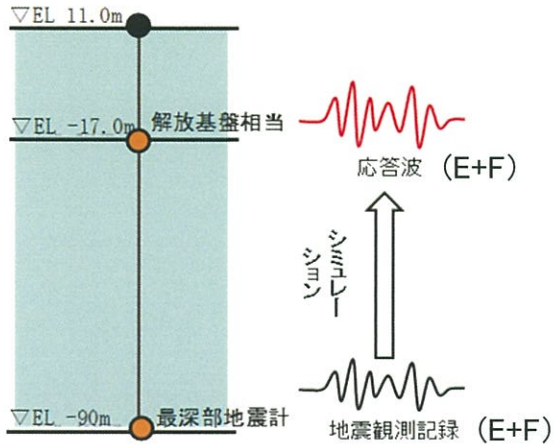
⑭ 熊本県阿蘇地方



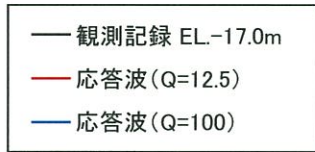
⑮ 熊本県阿蘇地方



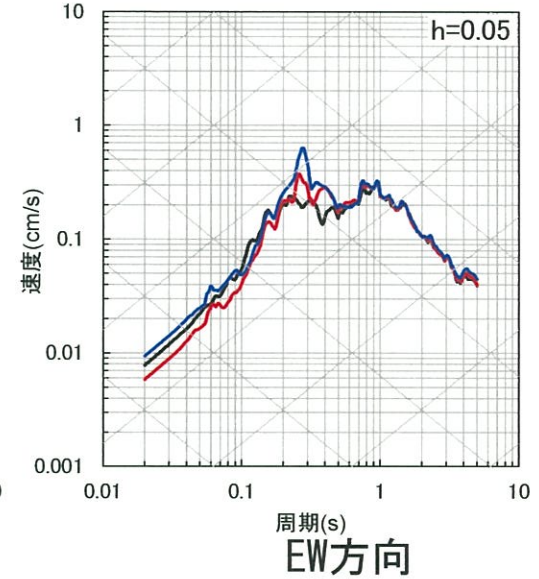
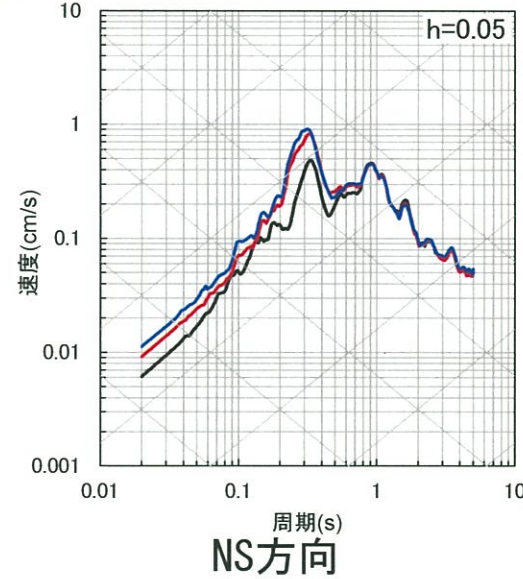
3. 地下構造モデルの設定



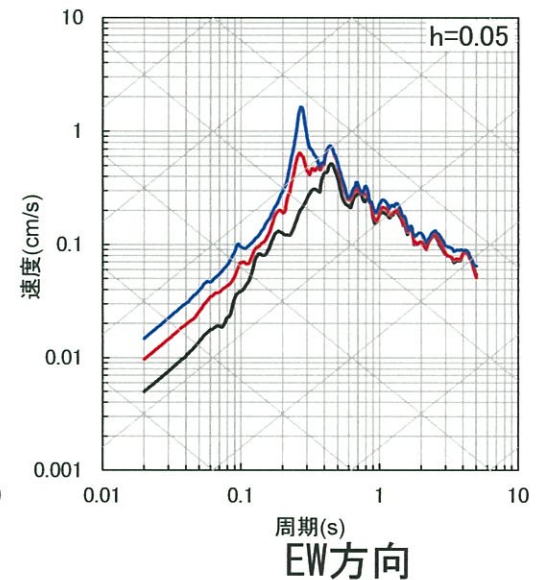
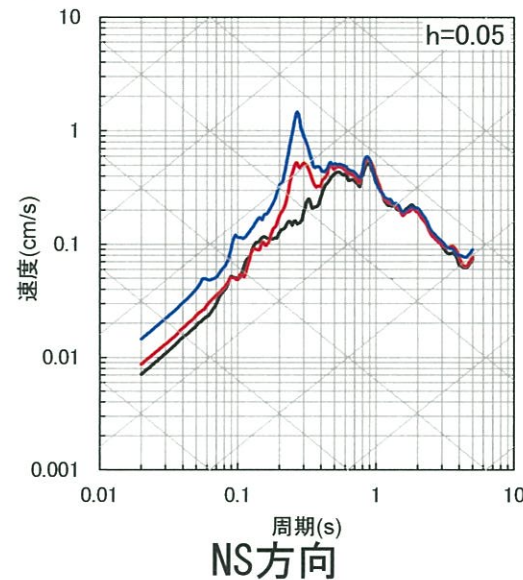
検証のイメージ



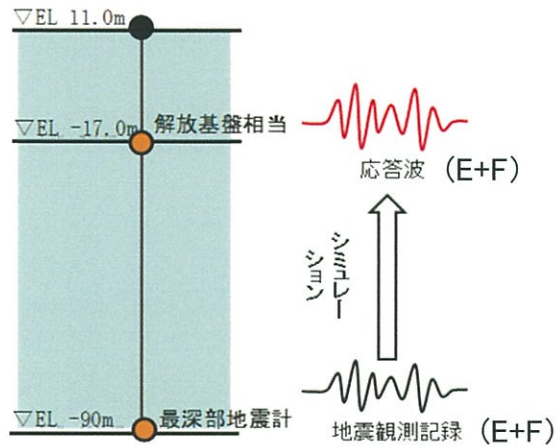
⑩熊本県熊本地方



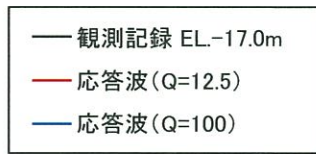
⑪熊本県熊本地方



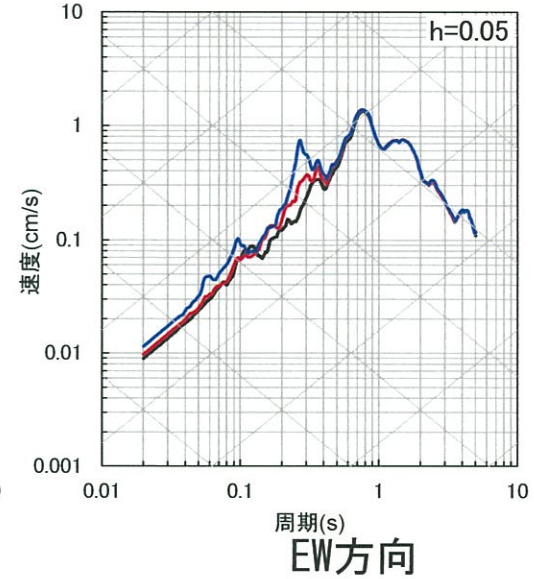
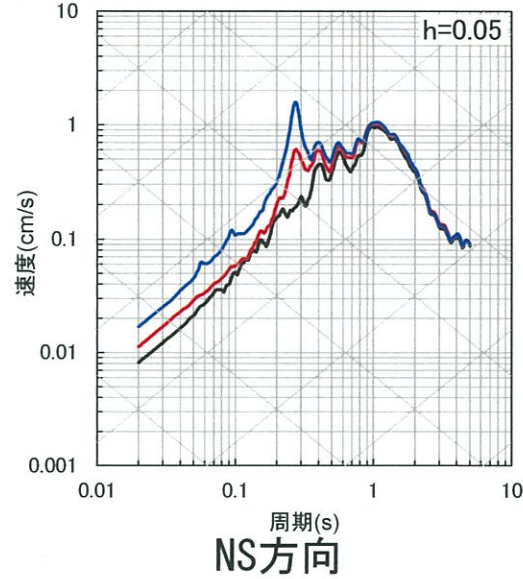
3. 地下構造モデルの設定



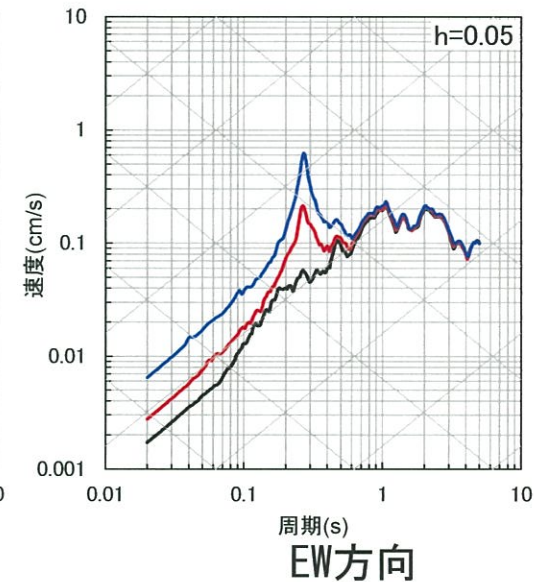
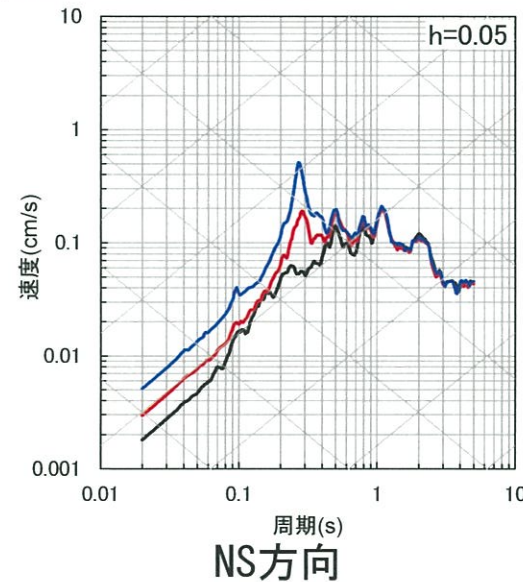
検証のイメージ



⑱ 熊本県阿蘇地方



⑲ 熊本県熊本地方



3. 地下構造モデルの設定

②精緻化範囲の設定及び検証

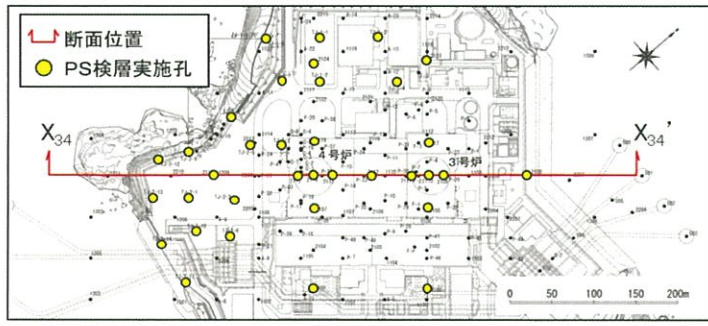
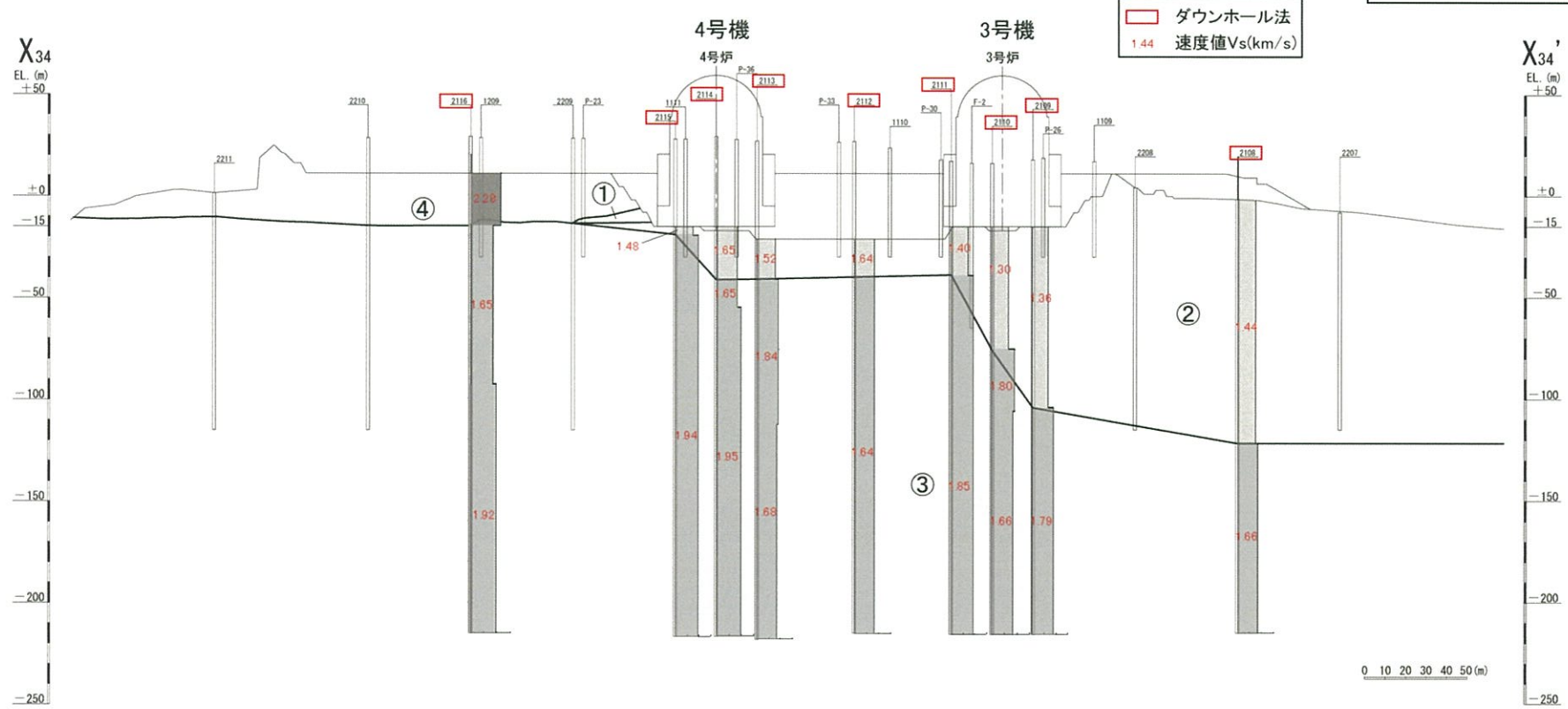
原子炉設置位置付近の速度層断面による設定

- 30～32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より浅部と、EL.-90.0mからEL.-200.0mまでの速度層に大きな差異が見られないことから、鉛直アレイ地震観測記録により設定した地盤減衰(Q値)をEL.-200mまで設定。

3. 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-X_{34'} 断面) (S波速度)



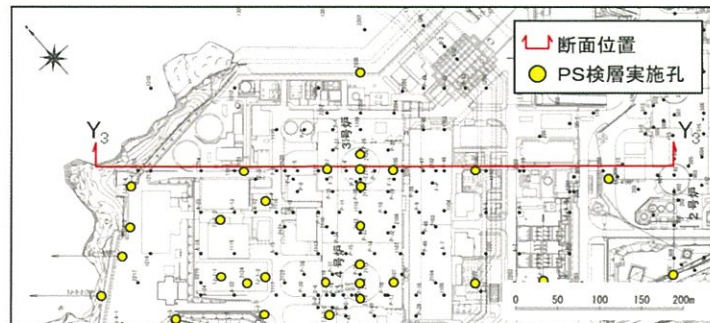
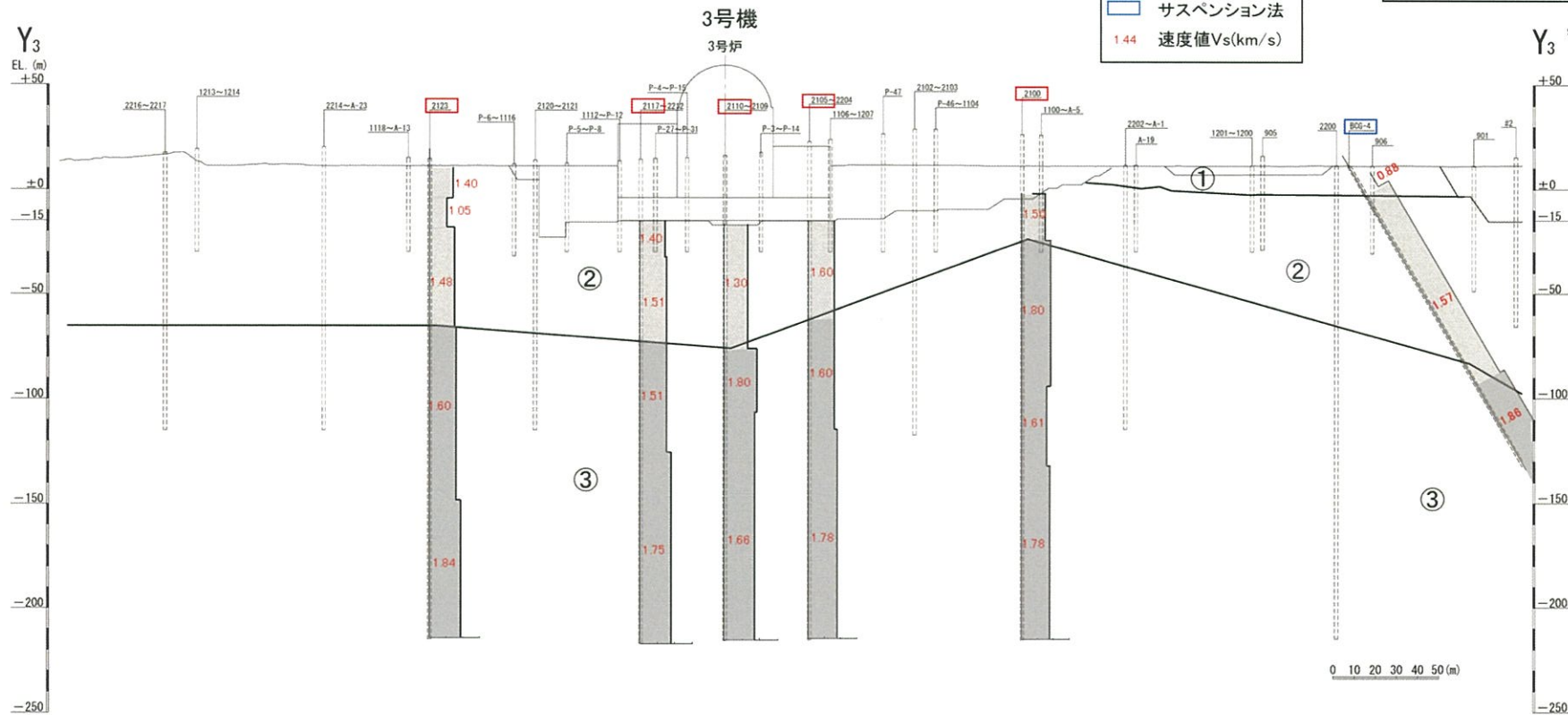
速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・ 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。

3. 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)



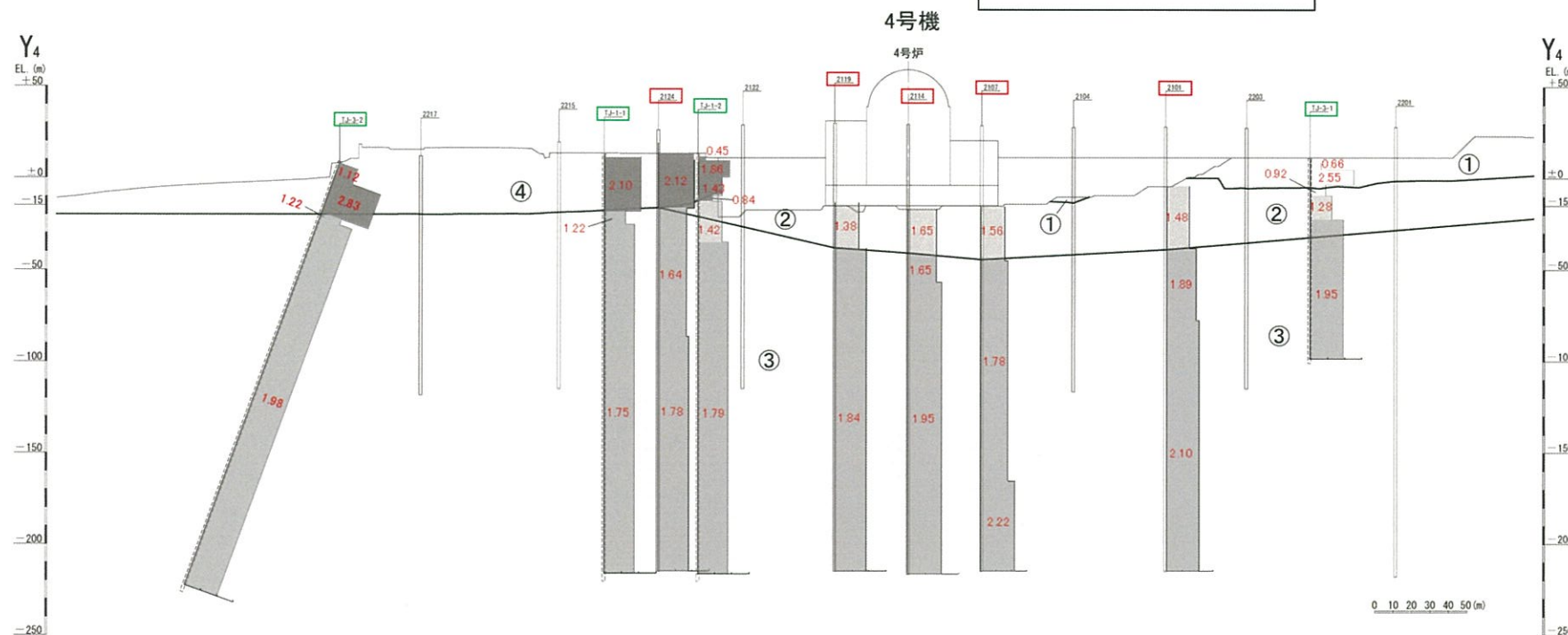
速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・ 原子炉基礎地盤は浅部でも速い速度 (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。

3. 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)



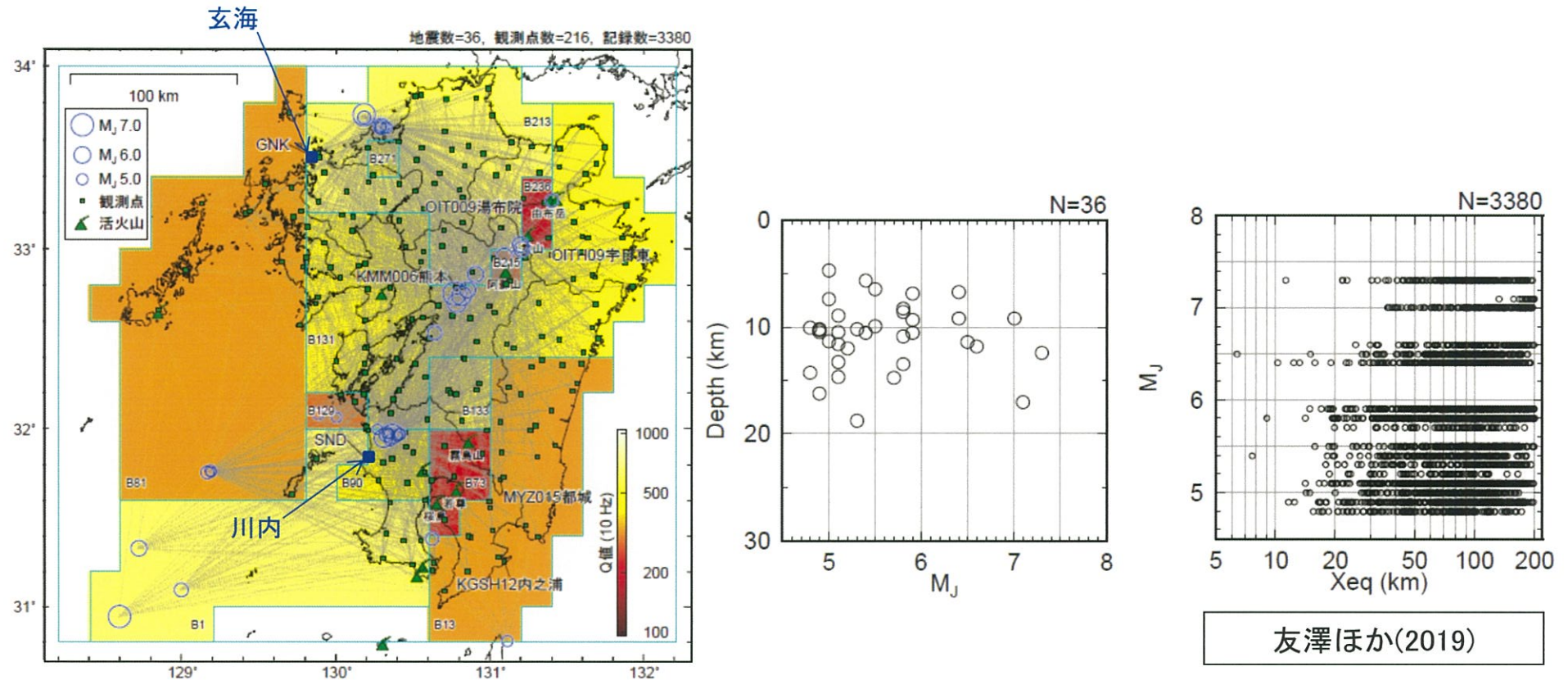
速度層区分	V _s (km/s)
①	0.79
②	1.44
③	1.80
④	2.03

- ・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。

3. 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(2019)^{4),5)}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。



検討に用いた地震の震央分布及び観測点位置

3. 地下構造モデルの設定

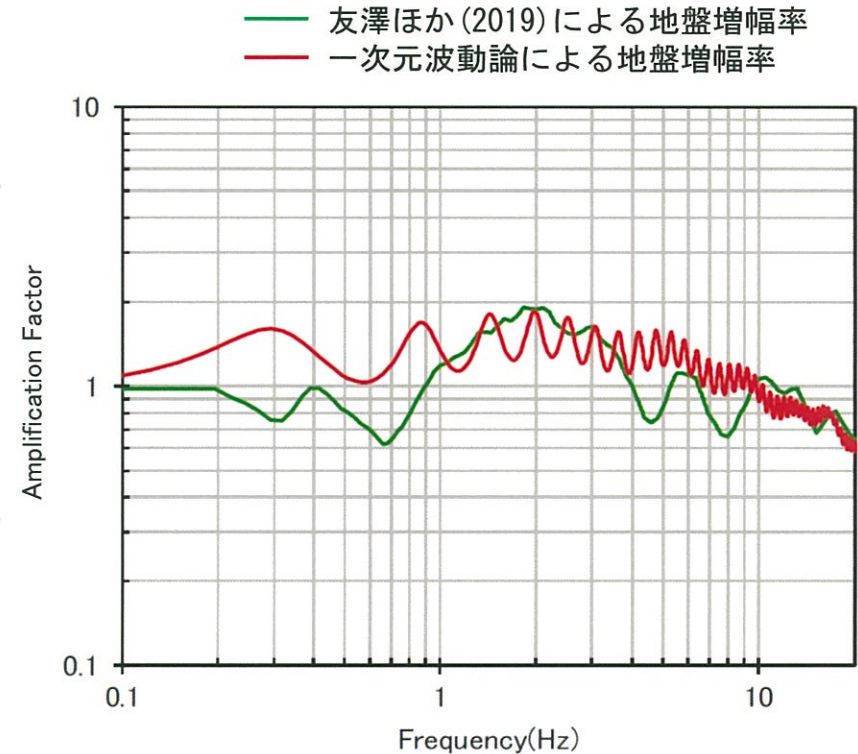
地震観測記録に基づく地盤増幅率による検証

- 友澤ほか(2019)では、地中観測点が地震基盤とみなせるOITH09(宇目東)とKGS12(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(2019)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(2019)による地盤増幅率より大きい傾向。

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



3. 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)	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

4. 地震基盤相当面の設定

「地震基盤相当面」の考え方

○ 許可基準解釈別記2第4条第5項第三号②

「地震基盤相当面（地震基盤からの地盤増幅率が小さく地震動としては地震基盤面と同等とみなすことができる地盤の解放面で、せん断波速度 $V_s=2200\text{m/s}$ 以上の地層をいう。）」

○ 検討チーム報告書⁶⁾

「地震基盤相当面の V_s は、地盤物性補正に用いたNoda et al. (2002)⁷⁾による経験式における定義を参考に $V_s=2200\text{m/s}$ 以上とした。」


「地盤物性補正に用いたNoda et al. (2002)の地盤増幅率の経験式においては、 $V_s=2200\text{m/s}$ の地盤を「地震基盤相当」と定義し、 $V_s=3000\text{m/s}$ 程度の地震基盤からの地盤増幅率は十分小さく、地震動としては同等とみなすことができると仮定している。なお、加藤ほか(1998)⁸⁾により、Noda et al. (2002)の地盤増幅率算定の基準となった小玉川観測点 ($V_s=2200\text{m/s}$) といわき観測点・富岡観測点 ($V_s=2800\text{m/s}$) の観測記録を用いた解析が行われ、両者の地盤増幅による地震動の差異が十分に小さいことが確認されている。」

○ 検討チーム報告書 参考資料⁹⁾

「一般に $V_s=2000\sim 3000\text{m/s}$ 程度での地盤増幅率は十分小さいと仮定し、地震基盤面での地震動レベルと考える。」

○ 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-2015¹⁰⁾

「せん断波速度 $2.0\sim 2.8\text{km/s}$ の地層は地震動を考える場合の基準となる地盤と考えられる。」

- 
- ・ 「地震基盤相当面」の物理的意味としては「地震基盤」からの地盤増幅率が小さく地震動として地震基盤面と同等と見なせる地盤の解放面と解釈。
 - ・ 「地震基盤相当面」は $V_s=2000\sim 3000\text{m/s}$ 程度の地層と解釈。

4. 地震基盤相当面の設定

- 前頁での解釈を踏まえ、玄海原子力発電所の地震基盤相当面は、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における $V_s=2100\text{m/s}$ の層上面 (EL. -200m) に設定。

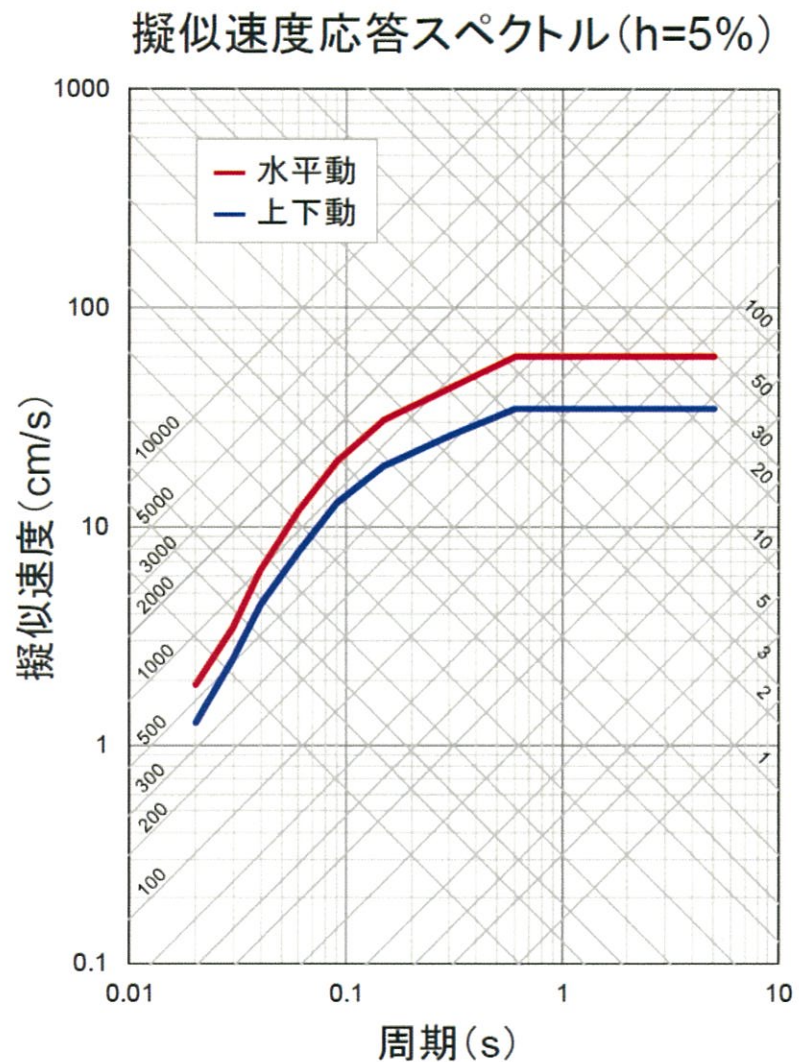
標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

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

▼地震基盤相当面

5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

- 地震基盤相当面における標準応答スペクトルに適合する模擬地震波を作成。



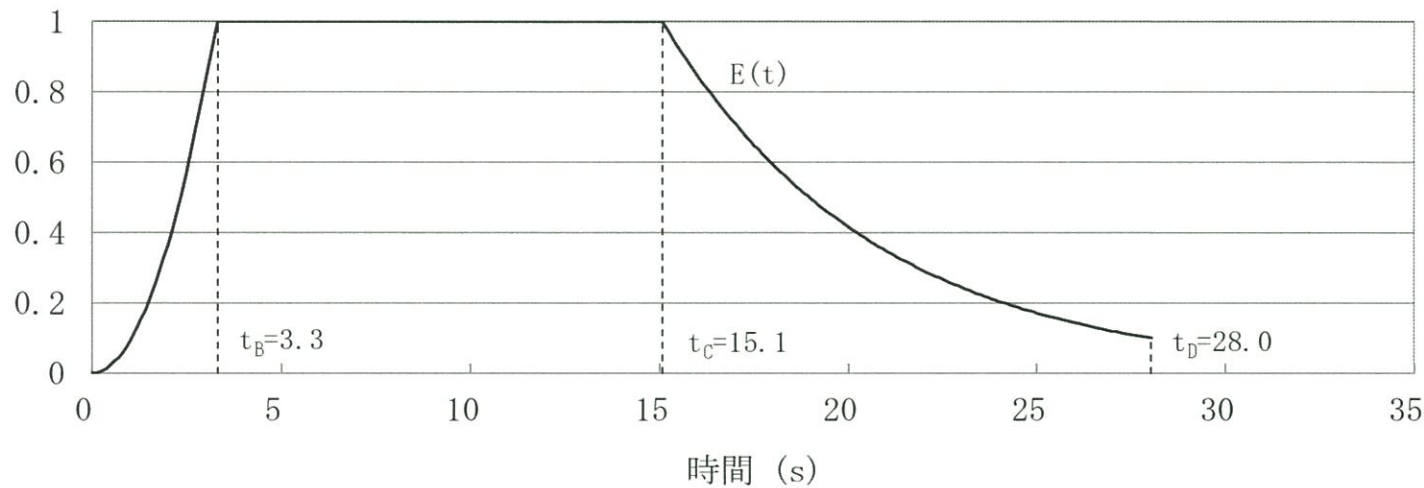
コントロールポイント

周期 (s)	水平動	上下動
	擬似速度 (cm/s)	擬似速度 (cm/s)
0.02	1.910	1.273
0.03	3.500	2.500
0.04	6.300	4.400
0.06	12.000	7.800
0.09	20.000	13.000
0.15	31.000	19.000
0.30	43.000	26.000
0.60	60.000	35.000
5.00	60.000	35.000

設置許可基準
規則解釈別記2

5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

- 模擬地震波の作成にあたっては、Noda et al. (2002)⁷⁾による振幅包絡線の経時的変化 (M6.9、Xeq10km) を採用し、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせにより作成。
- マグニチュードMについては、「全国共通に考慮すべき地震動」は「Mw6.5程度未満」とされていることから、Mw6.5相当のM6.9と設定。
- 等価震源距離Xeqについては、震源近傍を想定し、Xeq10kmと設定。



$$t_B = 10^{0.5M-2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M-1.0}$$

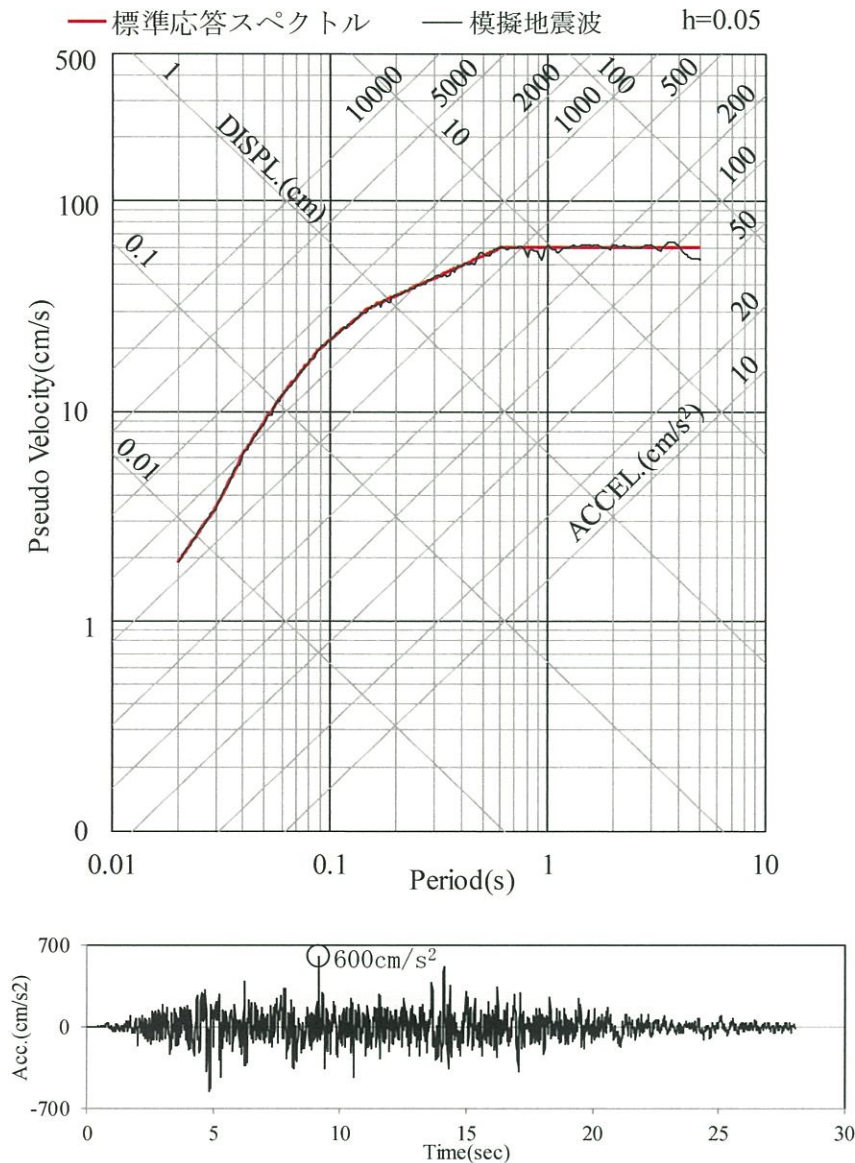
$$t_D - t_C = 10^{0.17M+0.541\log X_{eq}-0.6}$$

M6.9、Xeq10 km

	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的変化 (s)		
		t_B	t_C	t_D
水平	28.0	3.3	15.1	28.0
鉛直	28.0	3.3	15.1	28.0

5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

模擬地震波の作成結果(水平方向)



	作成結果
①応答スペクトル比R(T)	0.87 ≧ 0.85
②SI比	1.00 ≧ 1.0

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T : 周期 (s)

$S_{v1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

$$\textcircled{2} SI\text{比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

SI : 応答スペクトル強さ

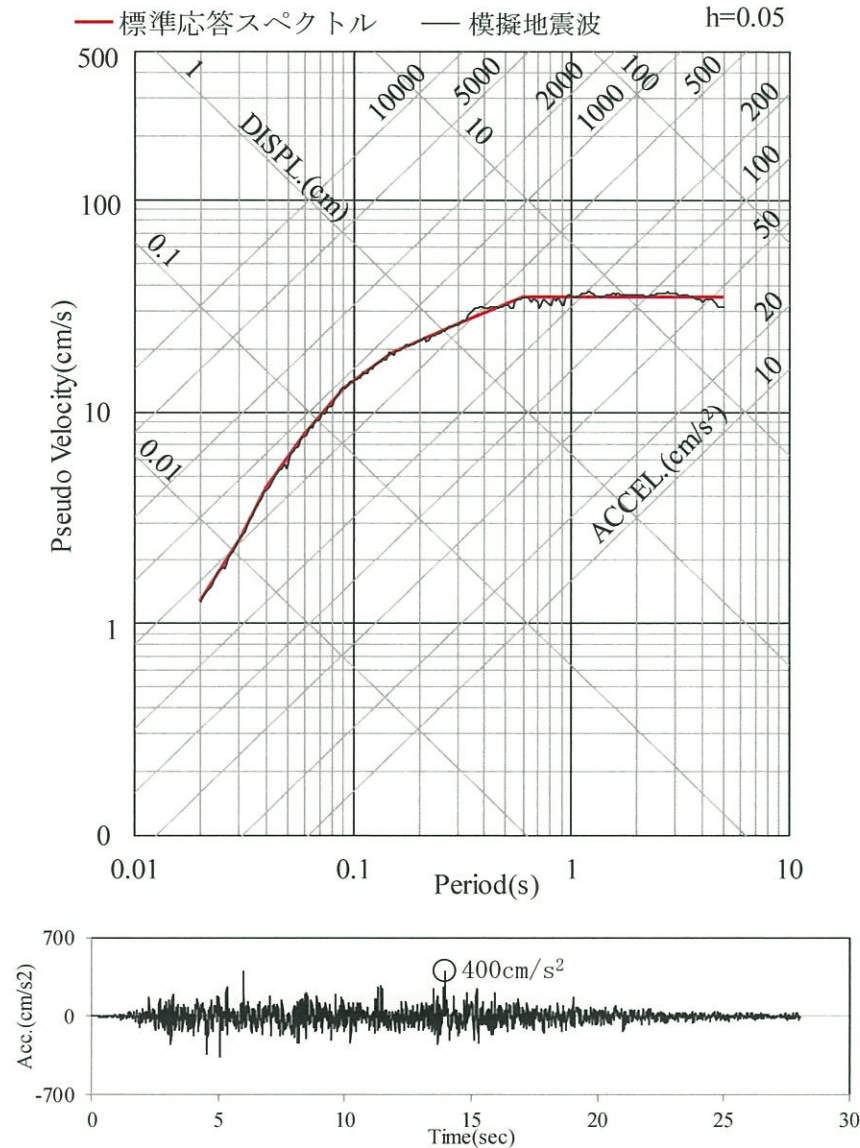
$S_v(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル(cm/s)

$\bar{S}_v(T)$: 目標とする応答スペクトル(cm/s)

T : 固有周期(s)

5. 地震基盤相当面における模擬地震波の作成

模擬地震波の作成結果(鉛直方向)



	作成結果
①応答スペクトル比R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI比	1.01 ≥ 1.0

$$\textcircled{1} R(T) = \frac{S_{V1}(T)}{S_{V2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

T : 周期 (s)

$S_{V1}(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{V2}(T)$: 目標とする応答スペクトル値

$$\textcircled{2} SI\text{比} = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_V(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_V(T) dt} \geq 1.0$$

SI : 応答スペクトル強さ

$S_V(T)$: 模擬地震波の応答スペクトル (cm/s)

$\bar{S}_V(T)$: 目標とする応答スペクトル (cm/s)

T : 固有周期 (s)

6. 解放基盤表面における地震動の設定

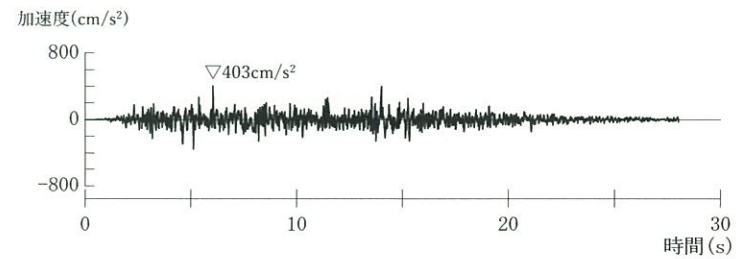
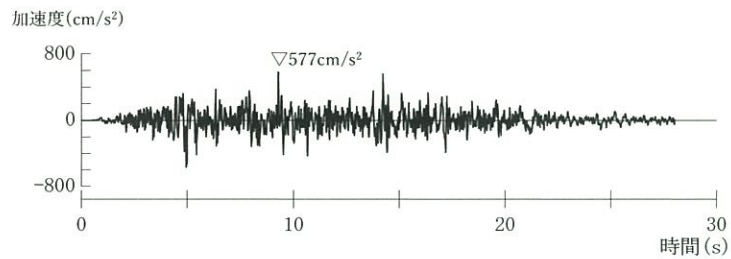
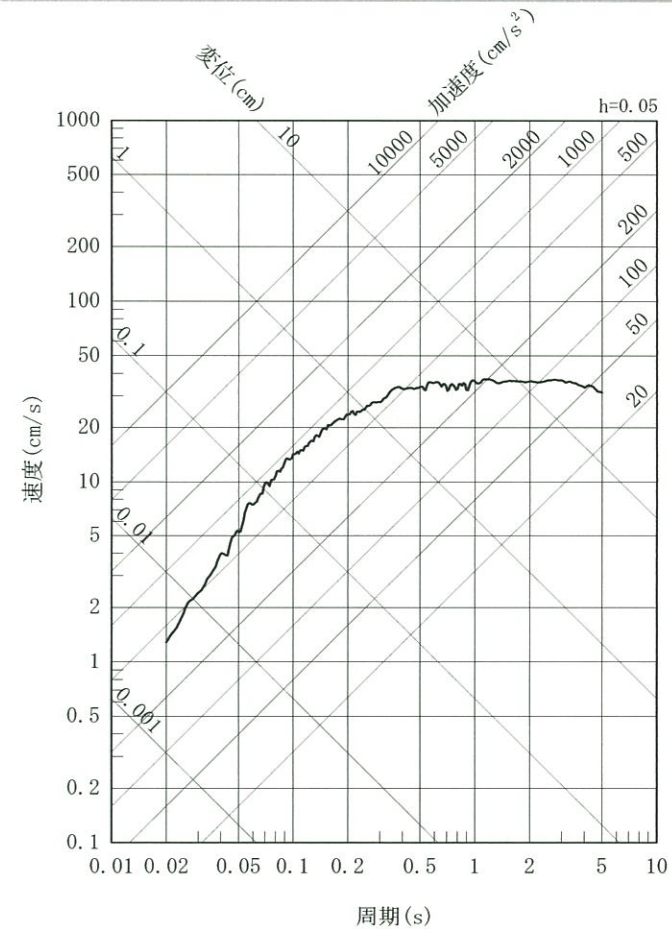
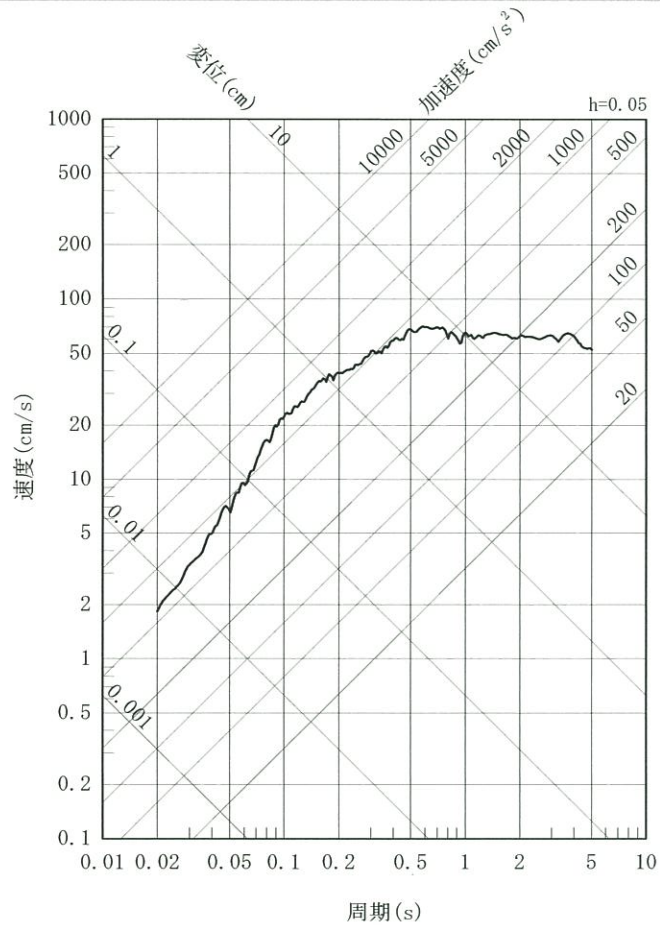
- 地震基盤相当面における模擬地震波を用いて、一次元波動論により、標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの $V_s=2100\text{m/s}$ の層上面から解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映し、解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定。

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
地震基盤相当面 -200m	5	-0.185	2.40	2100	4000	200

↑
一次元波動論による地震波の伝播特性の反映

6. 解放基盤表面における地震動の設定

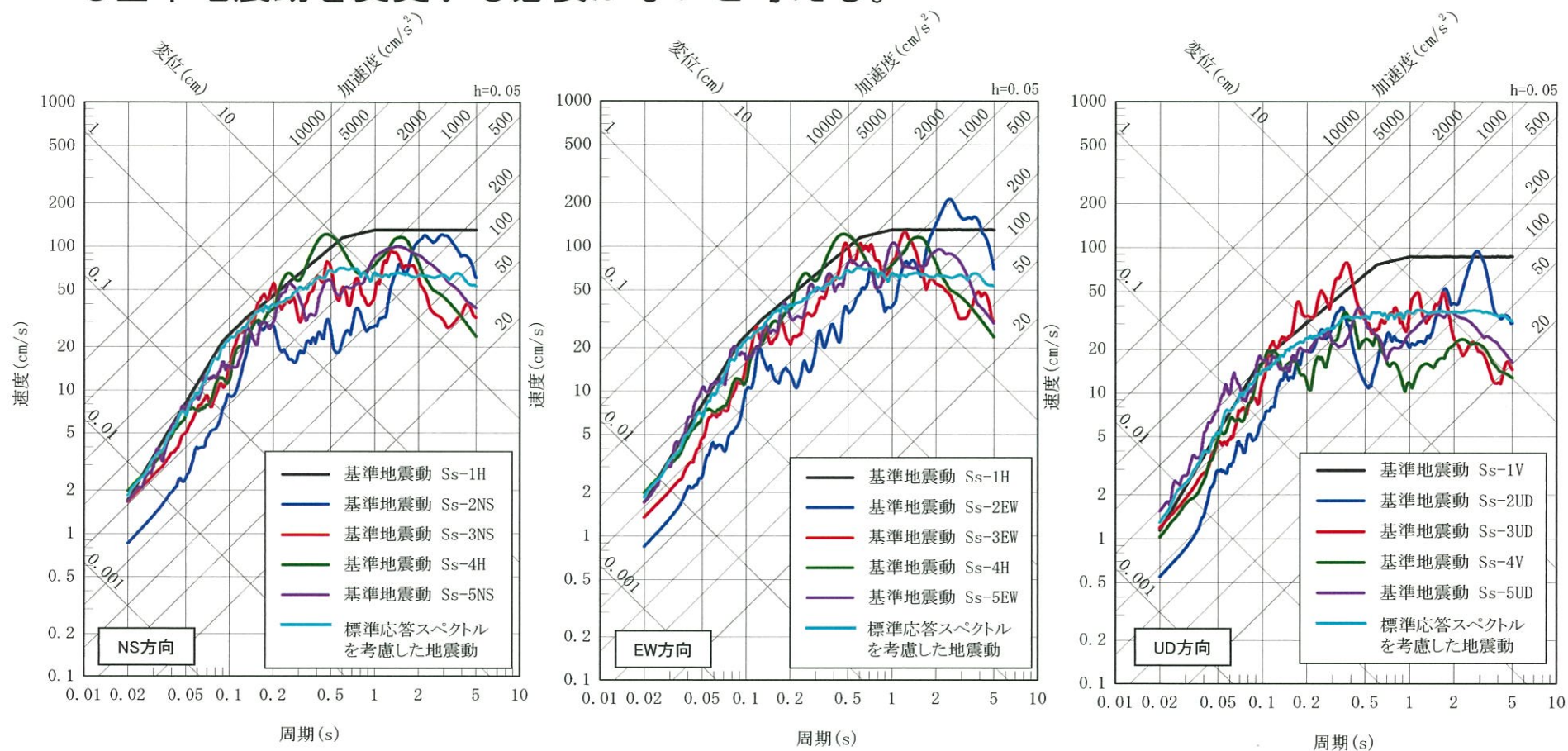


水平方向

鉛直方向

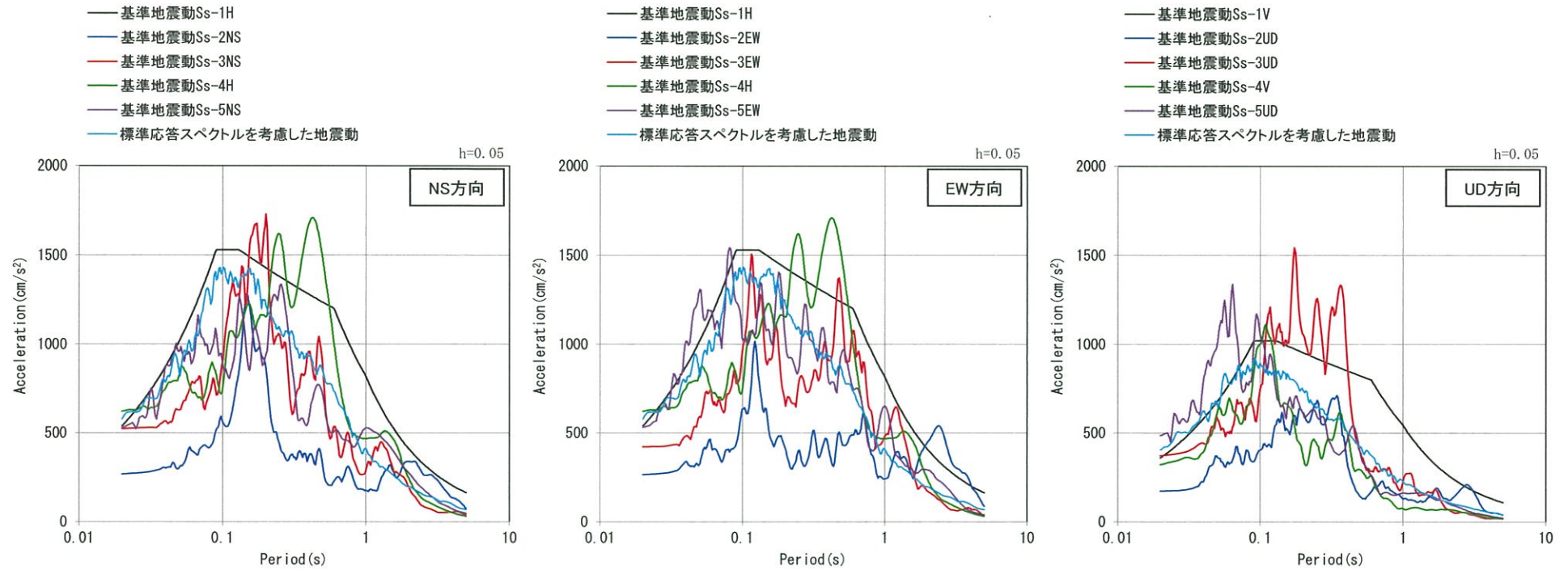
7. 現行の基準地震動との比較

- 現行の基準地震動（平成29年1月18日許可）の応答スペクトルと標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトルを比較した結果、標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトルは現行の基準地震動の応答スペクトルに包絡されることを確認。
- 以上より、玄海原子力発電所3号炉及び4号炉については、改正後の解釈を適用しても基準地震動を変更する必要がないと考える。



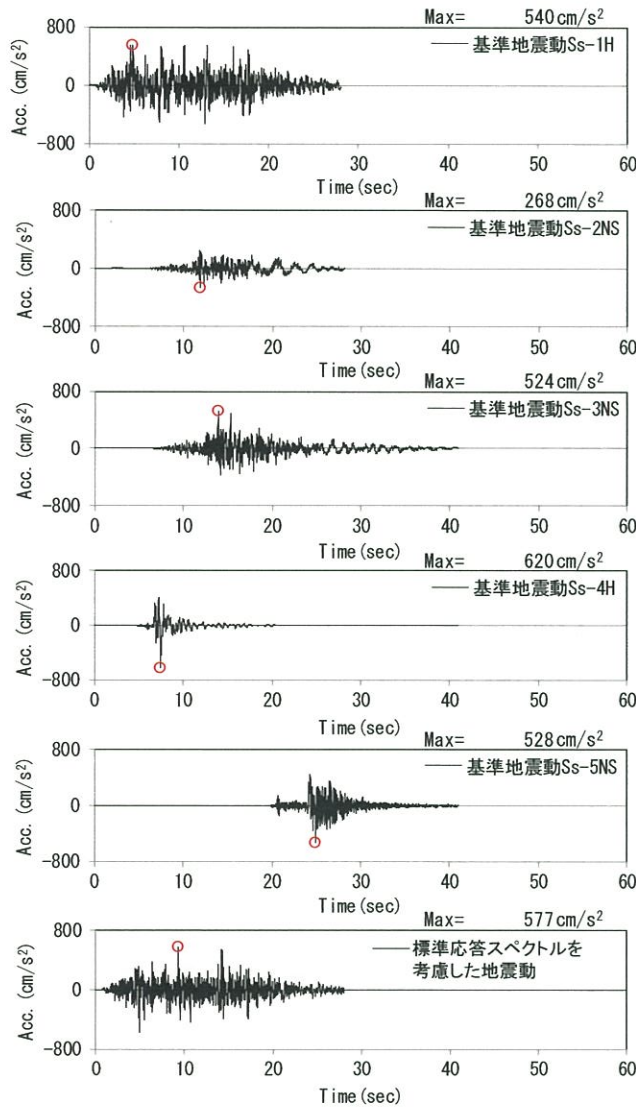
基準地震動と標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトル

7. 現行の基準地震動との比較

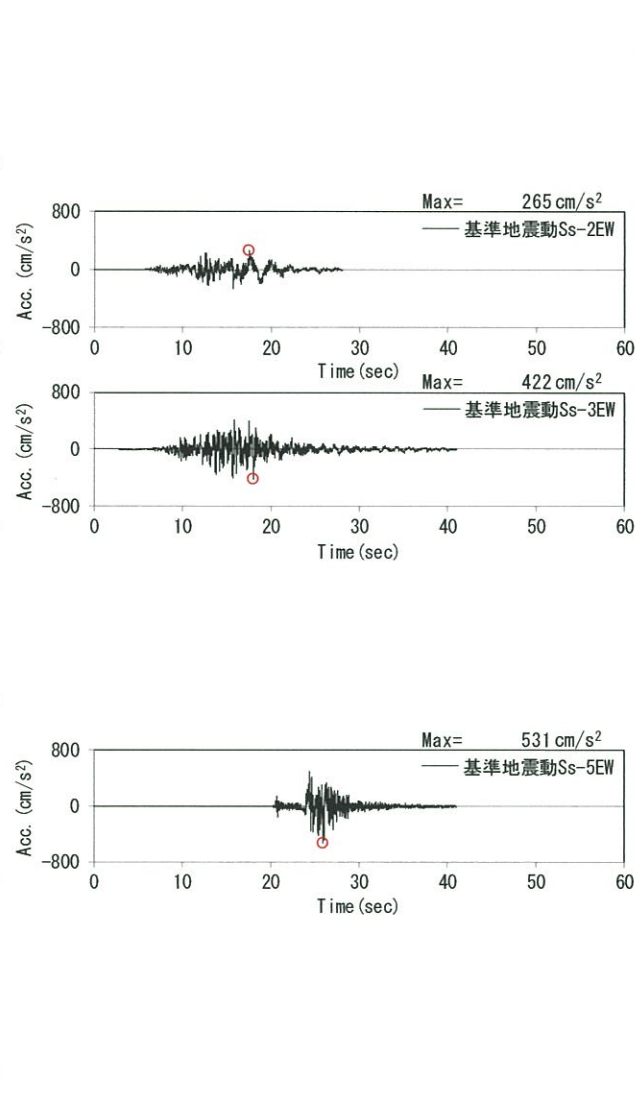


基準地震動と標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトル

7. 現行の基準地震動との比較



水平方向



鉛直方向

基準地震動と標準応答スペクトルを考慮した地震動の時刻歴波形

7. 現行の基準地震動との比較

基準地震動と標準応答スペクトルを考慮した地震動の最大加速度

(単位：cm/s²)

敷地ごとに震源を特定して策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
応答スペクトルに基づく手法		Ss-1	540		360
断層モデルを用いた手法	城山南断層	Ss-2	268	265	172
	竹木場断層	Ss-3	524	422	372
震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
全国共通で考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	留萌地震	Ss-4	620		320
地域性を考慮する地震動 (Mw6.5程度以上)	鳥取県西部地震	Ss-5	528	531	485

(単位：cm/s²)

震源を特定せず策定する地震動		Ss	水平方向 NS成分	水平方向 EW成分	鉛直方向 UD成分
全国共通で考慮すべき 地震動(Mw6.5程度未満)	標準応答スペクトル	—	577		403

【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 37頁に示す通り、玄海原子力発電所の地震基盤相当面は、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における $V_s=2100\text{m/s}$ の層上面(EL. -200m)に設定。
- ただし、上記設定における $V_s=2100\text{m/s}$ は、設置許可基準規則解釈別記2に示される $V_s=2200\text{m/s}$ 以上を下回るため、次頁以降で、仮想的に、 $V_s=2200\text{m/s}$ の層を設定し、解放基盤表面までの地盤増幅率の検討を実施。

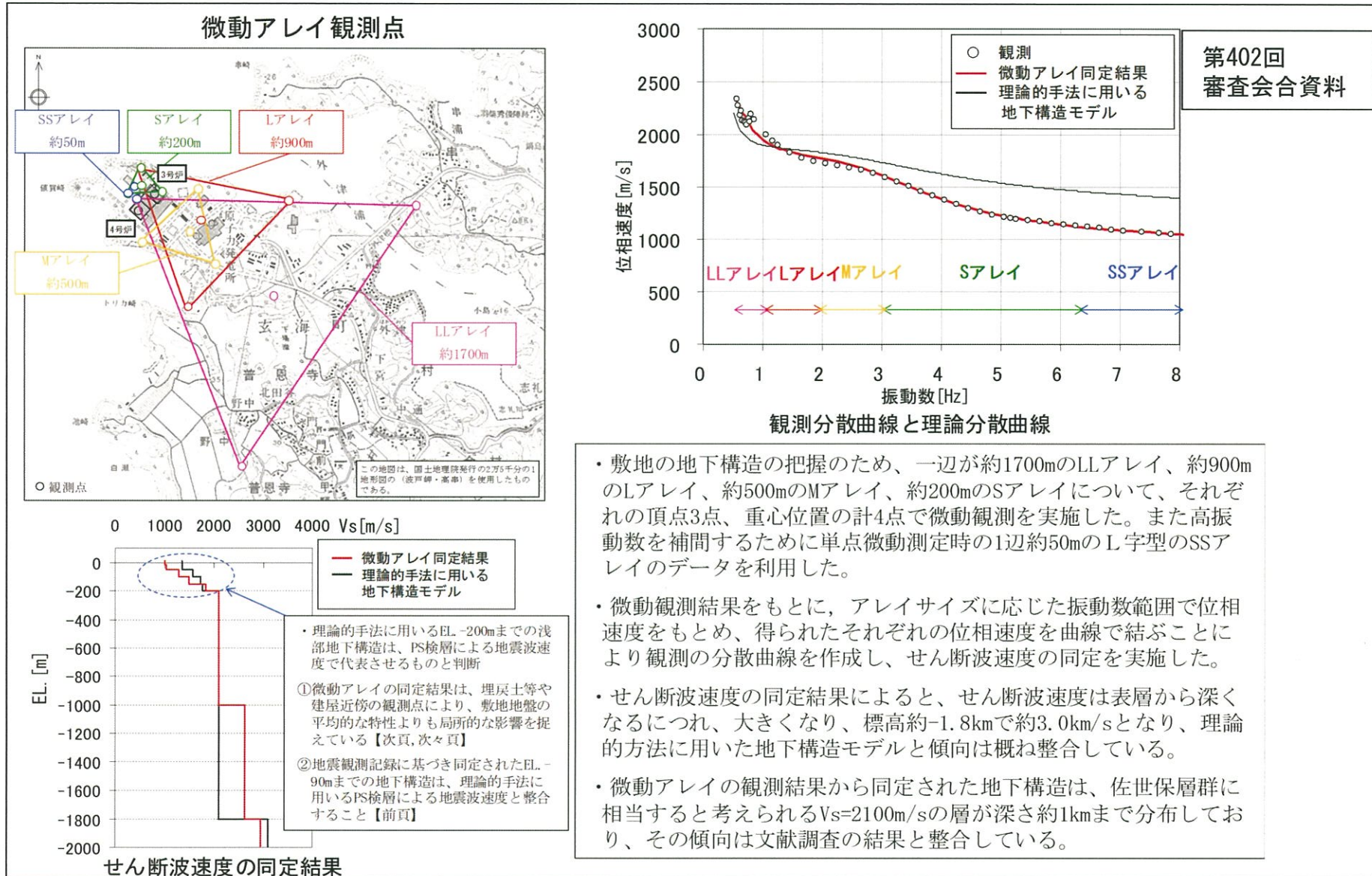
標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる一次元地下構造モデル

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

▼地震基盤相当面

【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- $V_s=2100\text{m/s}$ の層は、7頁に示すとおり、地震調査委員会の知見を踏まえ設定。
- $V_s=2100\text{m/s}$ は、既許可時審査における微動アレイ観測に基づくせん断波速度の同定結果と整合。



【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 既許可時審査の微動アレイ観測に基づくせん断波速度の同定結果における $V_s=2110\text{m/s}$ の層(第5層)を2分割し、新たに地震基盤相当面に対応する層(第5'層: $V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4200\text{m/s}$)を設け、この層の上面の深度を変数とした再同定を実施。

既許可時審査における同定モデル				
	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
EL. 11m	0	2.35	1000	2760
-15m	1	2.35	1030	2780
-50m	2	2.35	1290	3050
-100m	3	2.35	1500	3260
-150m	4	2.35	1830	3640
-200m	5	2.40	2110	3990
-1000m	6	2.40	2630	4700
-1804m	7	2.60	2950	5180

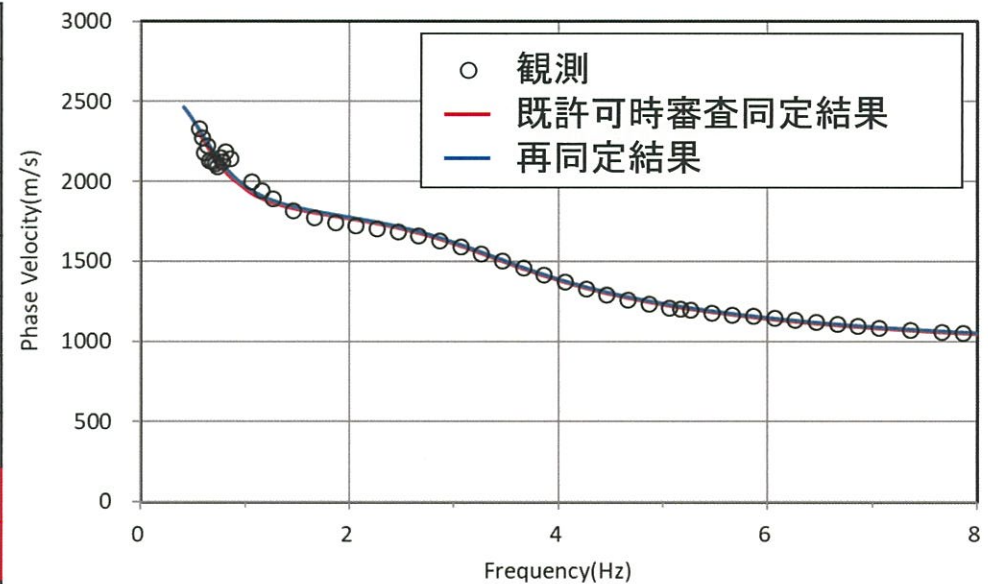


再同定に用いるモデル				
	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
EL. 11m	0	2.35	1000	2760
-15m	1	2.35	1030	2780
-50m	2	2.35	1290	3050
-100m	3	2.35	1500	3260
-150m	4	2.35	1830	3640
-200m	5	2.40	2110	3990
-●m	5'	2.40	2200	4200
-1000m	6	2.40	2630	4700
-1804m	7	2.60	2950	5180

【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 仮想的に、新たに地震基盤相当面に対応する層(第5'層: $V_s=2200\text{m/s}$ 、 $V_p=4200\text{m/s}$)を設定し、微動アレイ観測結果に基づく再同定を実施した結果、第5'層の上面の深度はEL. -884mとなった。

	再同定結果			
	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
EL. 11m	0	2.35	1000	2760
-15m	1	2.35	1030	2780
-50m	2	2.35	1290	3050
-100m	3	2.35	1500	3260
-150m	4	2.35	1830	3640
-200m	5	2.40	2110	3990
-884m	5'	2.40	2200	4200
-1000m	6	2.40	2630	4700
-1804m	7	2.60	2950	5180



理論位相速度と観測位相速度の比較

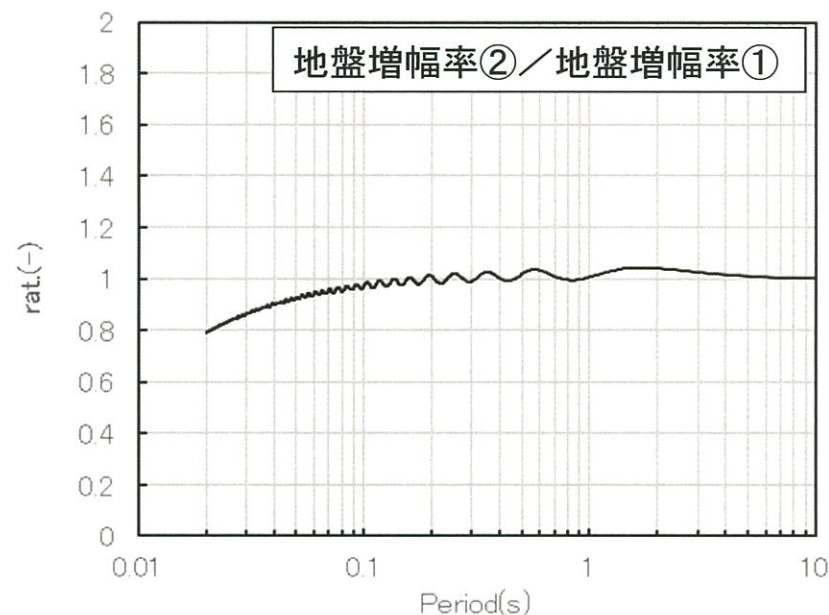
【参考1】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

- 前頁の検討結果を、35頁に示す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に反映した仮想的な地下構造モデルを設定。
- 今回の標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルの $V_s=2100\text{m/s}$ の層上面から解放基盤表面までの地盤増幅率(①)と仮想的な地下構造モデルの $V_s=2200\text{m/s}$ の層上面から解放基盤表面までの地盤増幅率(②)を比較した結果、短周期側では、仮想的な地下構造モデルの地盤増幅率(②)のほうが小さい傾向。
- これを踏まえ、37頁に示すとおり、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における $V_s=2100\text{m/s}$ の層上面に地震基盤相当面を設定。

比較に用いる地下構造モデル

EL. (m)	層	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	Q値
-15m	1	2.35	1350	3000	12.5
-50m	2	2.35	1570	3440	12.5
-100m	3	2.35	1730	3470	12.5
-150m	4	2.35	1770	3650	12.5
-200m	5	2.40	2100	4000	200
-884m	5'	2.40	2200	4200	200

↑ 地盤増幅率①
↑ 地盤増幅率②



地盤増幅率の比較

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 改正された「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（令和3年4月21日原子力規制委員会決定）（以下、「審査ガイド」とする。）における模擬地震波の作成に関する主な改正点は以下のとおり。

5.2 基準地震動の策定

- (1) (略)
- (2) (略)
- (3) 震源を特定せず策定する地震動による基準地震動は、設定された応答スペクトル（地震動レベル）に対して、地震動の継続時間及び経時的変化等の特性が適切に考慮されていることを確認する。また、設定された応答スペクトルに基づいて模擬地震動を作成する場合には、複数の方法（例えば、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、実観測記録の位相を用いる方法等）により検討が行われているを確認する。

- 「震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム」（第8回会合）では、
A：正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法、B：実観測記録の位相を用いる方法、C：断層破壊過程を考慮した群遅延時間を与える方法が例示。
- 「標準応答スペクトル」を考慮した模擬地震波は、38～41頁に示すとおり、正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法により作成しているが、次頁以降でそれ以外の方法による模擬地震波を作成し、検討を実施。

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

方法A～Cに基づく模擬地震波の作成方針

方法A：正弦波の重ね合わせによる位相を用いる方法（38～41頁参照）

方法B：実観測記録の位相を用いる方法

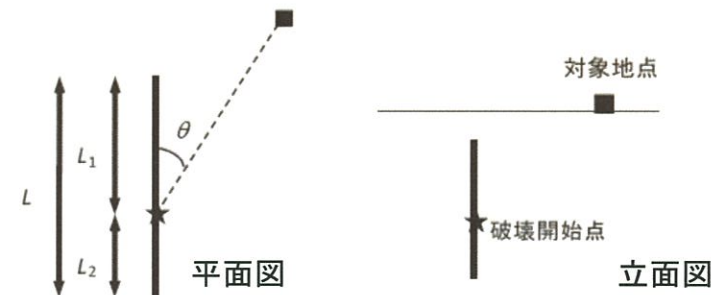
- ・ 2005年4月20日福岡県西方沖地震最大余震における敷地地盤における地震観測記録の実位相を採用。

方法C：断層破壊過程を考慮した群遅延時間を与える方法

- ・ 壇ほか(2010)¹¹⁾の横ずれ断層を想定した震源モデルを用い、佐藤・岡崎(2013)¹²⁾による群遅延時間を考慮した手法を用いた経時特性モデルを採用。

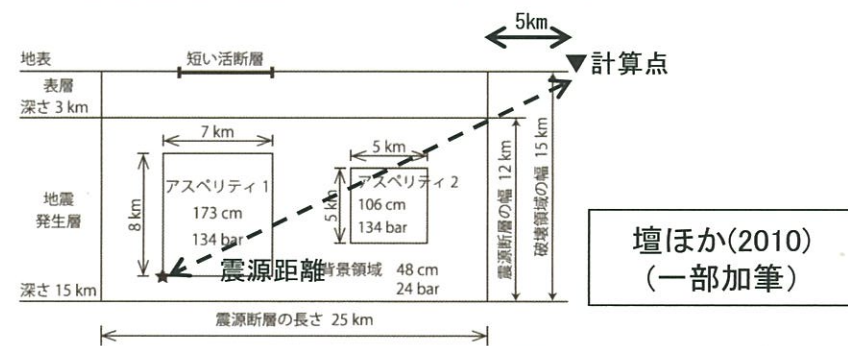
2005年福岡県西方沖地震 地震諸元

発生日時	2005年3月20日 本震	2005年4月20日 最大余震
マグニチュード	7.0	5.8
Mw	6.5	5.4
震源深さ	9.24km	13.50 km
震央距離	40km	46 km
震源距離	41km	48 km



佐藤・岡崎(2013)

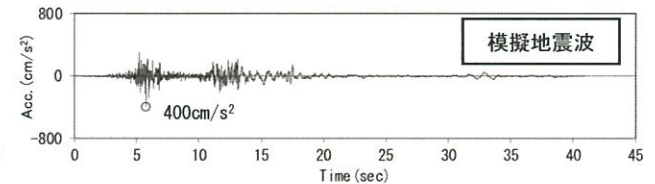
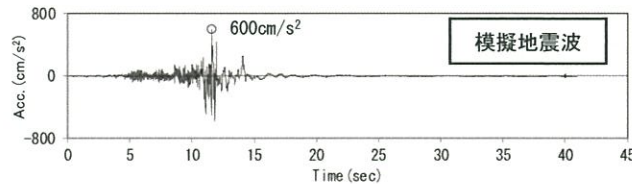
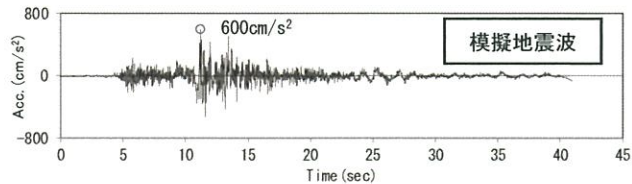
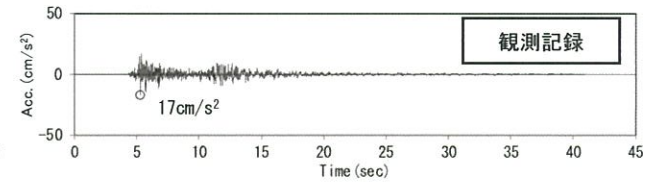
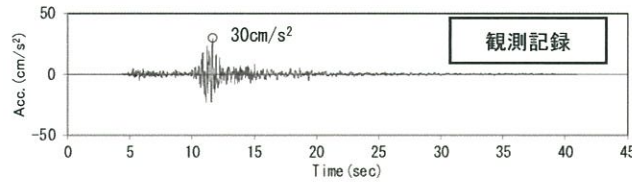
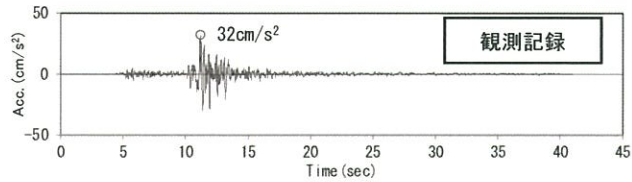
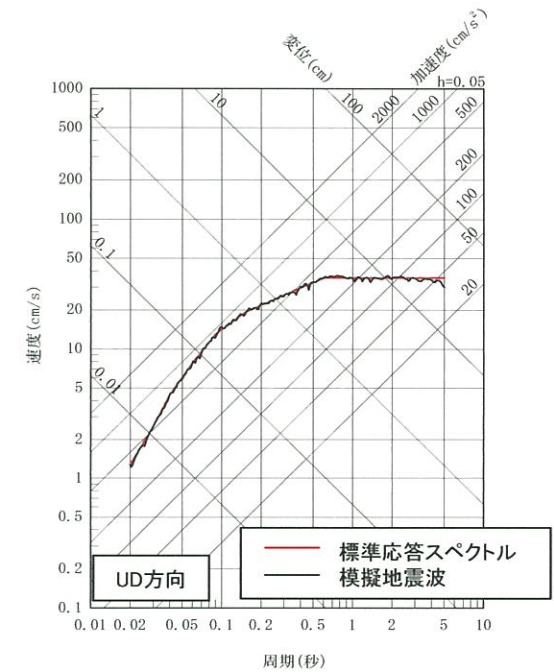
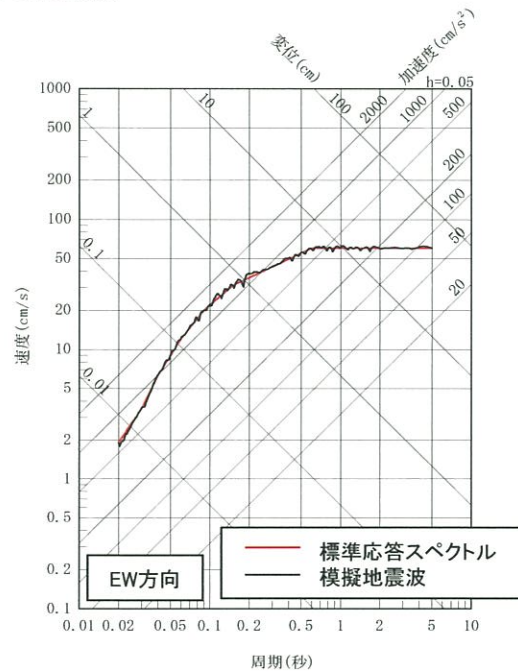
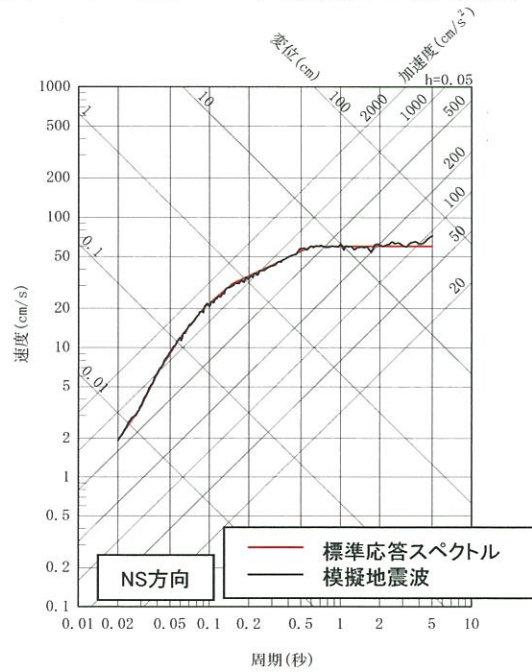
破壊伝播補正モデルに用いるパラメータ



検討に用いた横ずれ断層の震源モデル

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

方法Bに基づく模擬地震波の作成結果



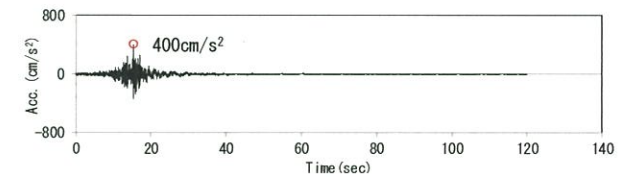
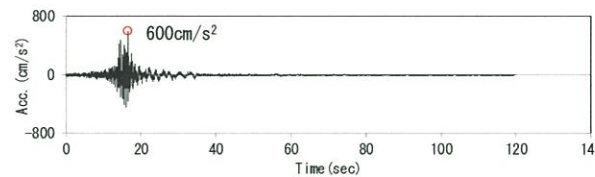
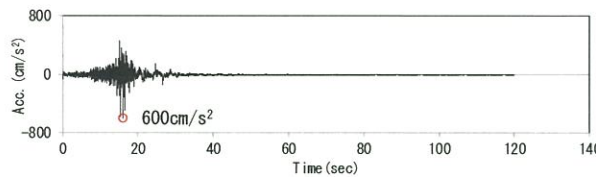
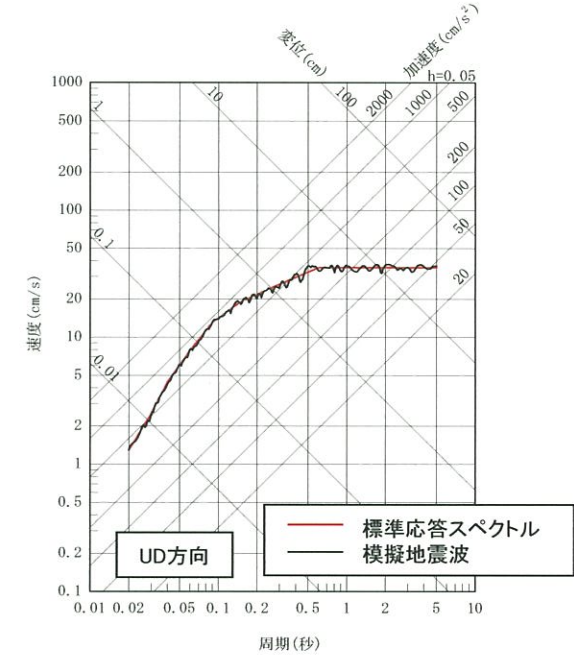
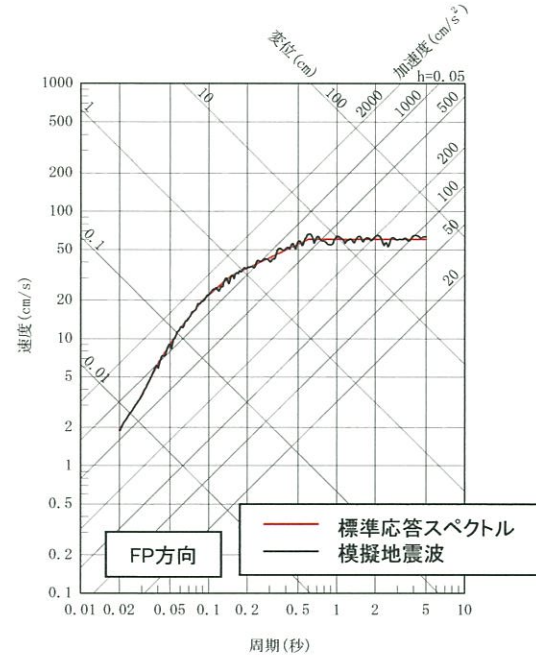
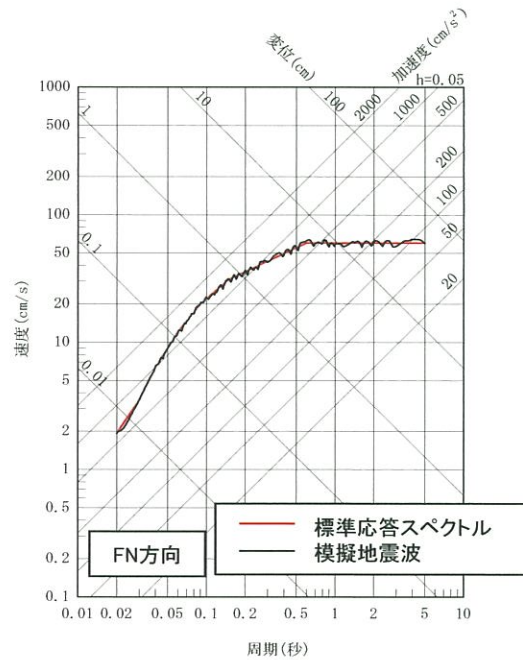
作成結果	
①R(T)	0.90 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

作成結果	
①R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

作成結果	
①R(T)	0.85 ≥ 0.85
②SI	1.01 ≥ 1.0

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

方法Cに基づく模擬地震波の作成結果



	作成結果
①R(T)	0.91 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

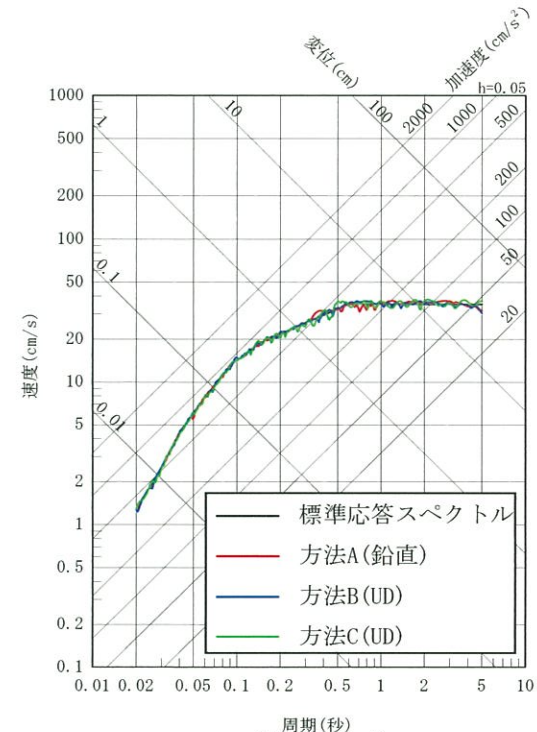
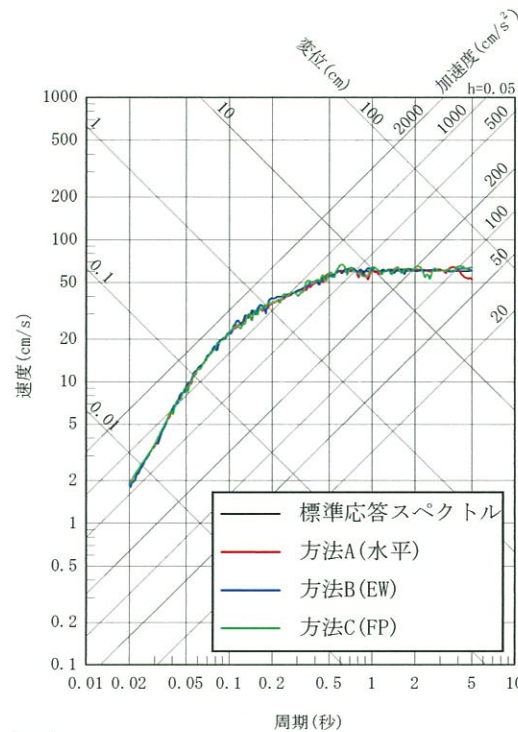
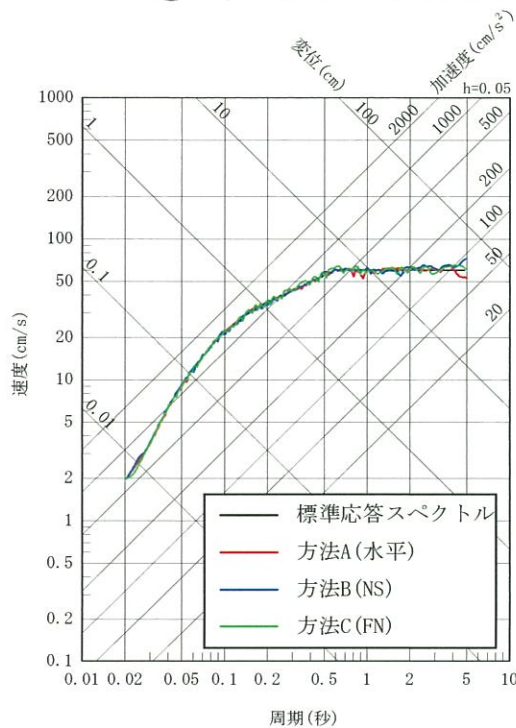
	作成結果
①R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI	1.00 ≥ 1.0

	作成結果
①R(T)	0.88 ≥ 0.85
②SI	1.01 ≥ 1.0

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

方法A～Cに基づく模擬地震波の比較・検討

- 方法A～Cに基づく模擬地震波は、標準応答スペクトルに適合するよう作成していることから、応答スペクトルでは大きな差異は見られない。
- 応答スペクトル以外の以下に示す指標を用いて、構造物への影響の観点から比較・検討を実施。
 - ① 累積絶対速度 (CAV値)
 - ② 地震入力エネルギースペクトル
 - ③ 弾塑性応答スペクトル



水平方向

方法A～Cに基づく模擬地震波の応答スペクトル

鉛直方向

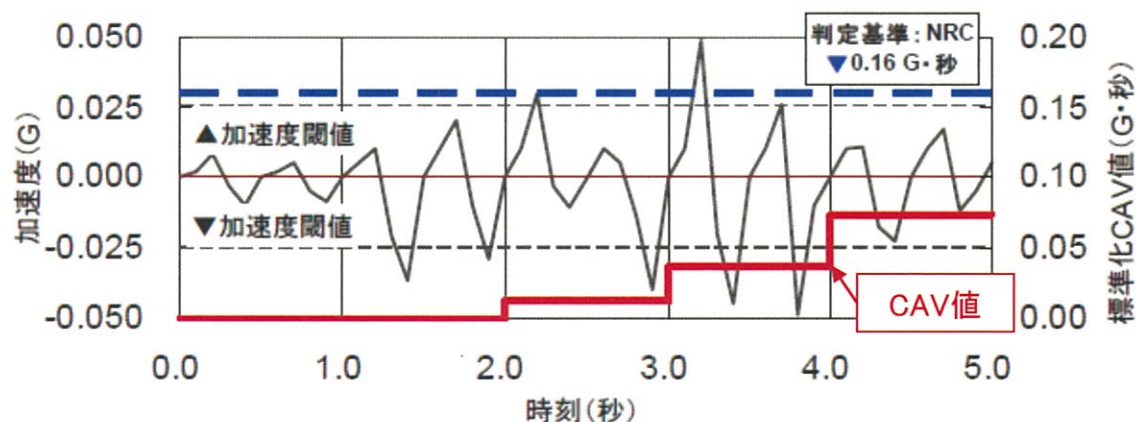
【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

① 累積絶対速度 (CAV値)

- CAV値は、米国EPRI(電力中央研究所)が、地震の揺れの強さを計る指標の一つとして、設備の損傷にはほとんど影響しないと考えられるパルス的な加速度振幅による不要な炉停止を回避する目的で開発。
- 米国では岩盤露頭の観測記録を地震後に確認し、プラントの地震後停止を判断する補助指標として運用されており、立地地域の地震動特性を分析し、CAV値とプラント設備の損傷との関係を求め、敷地の適切な加速度閾値と炉停止判定基準を設けている。
- CAV値(標準化CAV値)自体は、加速度時刻歴の時々刻々の変化を1秒区間毎に確認し、その区間内の最大値がある閾値(NRC:0.025G≒24.5Gal)を超過した場合にそのCAVi値(=[1秒区間内の加速度振幅の絶対値×時間刻み])の和、単位:G・秒)を累積していくもの。

$$CAV = CAV_i + \int_i^{i+1} ABS[a(t)]dt$$

- 米国NRCによれば、この標準化CAV値が0.16G・秒を超過するとプラント停止の判断手順に入ることとなっている。



水谷ほか(2008)¹³⁾
(一部加筆)

標準化CAV値の概念模式図

- 本検討では、閾値を300Galとし、検討を実施。

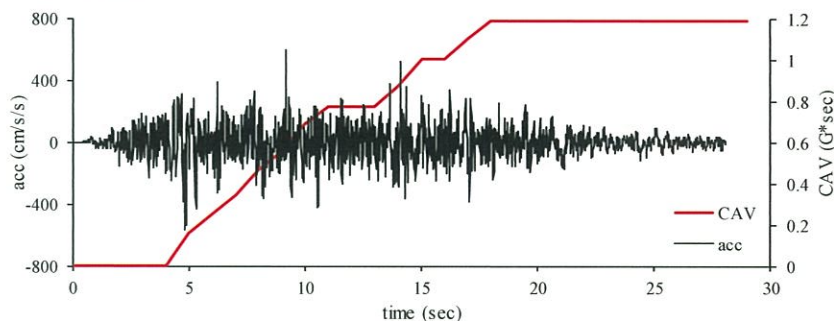
【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

○ 前頁に基づき算出したCAV値は、方法Aが方法B及び方法Cより大きい。

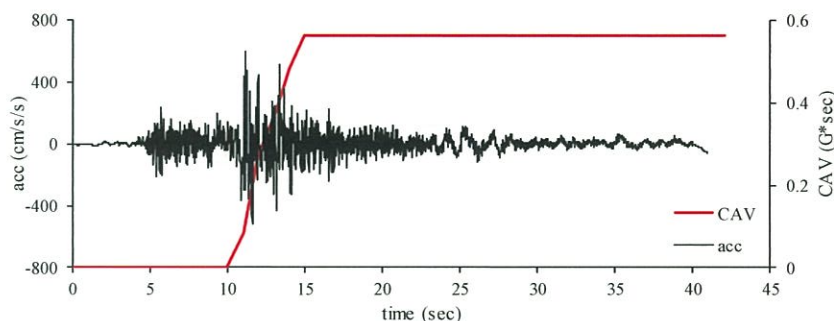
方法A～Cに基づく模擬地震波の
CAV値算出結果

模擬地震波		CAV値[G・秒]
方法A	水平動	1.19
方法B	NS方向	0.56
	EW方向	0.25
方法C	FN方向	0.30
	FP方向	0.39

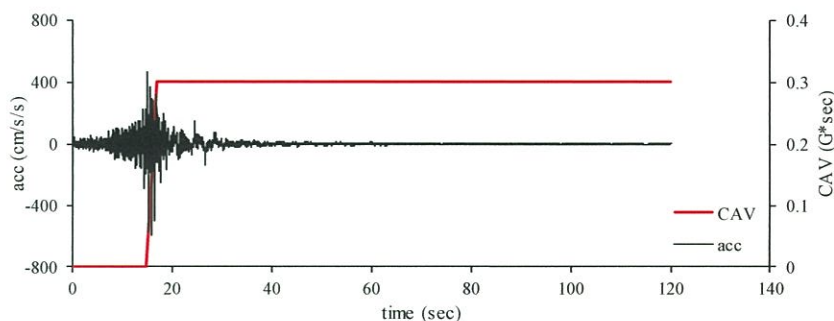
【方法A】(水平動)



【方法B】(NS方向)



【方法C】(FN方向)



方法A～Cに基づく模擬地震波のCAV値算出結果の例

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

② 地震入力エネルギースペクトル

○ 地震入力エネルギースペクトルは、地震動の全継続時間において構造物に入力される総エネルギー量を等価速度 V_E に換算し、構造物の固有周期との関係を表現したもの。

運動方程式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = -M\ddot{x}_0$$

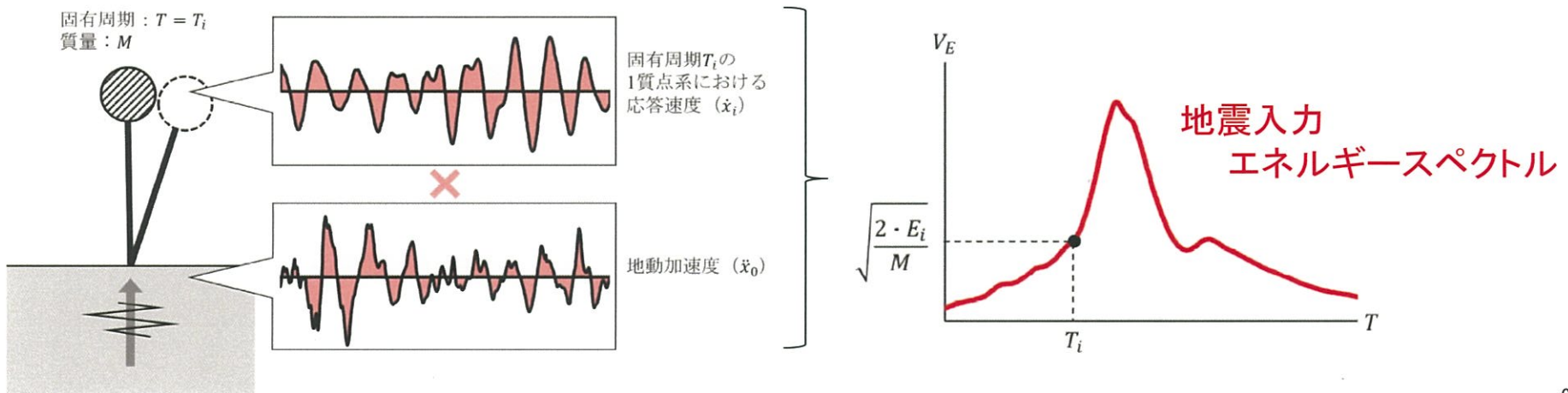
↓ 運動方程式の両辺に $\dot{x}dt (= dx)$ を乗じて、
全継続時間 t_n で時間積分

エネルギー方程式
$$\int_0^{t_n} M\ddot{x} \dot{x} dt + \int_0^{t_n} C \dot{x}^2 dt + \int_0^{t_n} kx \dot{x} dt = - \int_0^{t_n} M\ddot{x}_0 \dot{x} dt$$

M : 質点の質量
 x : 質点の相対変位
 C : 減衰係数
 k : 質点系の復元力
 \ddot{x}_0 : 地動の加速度

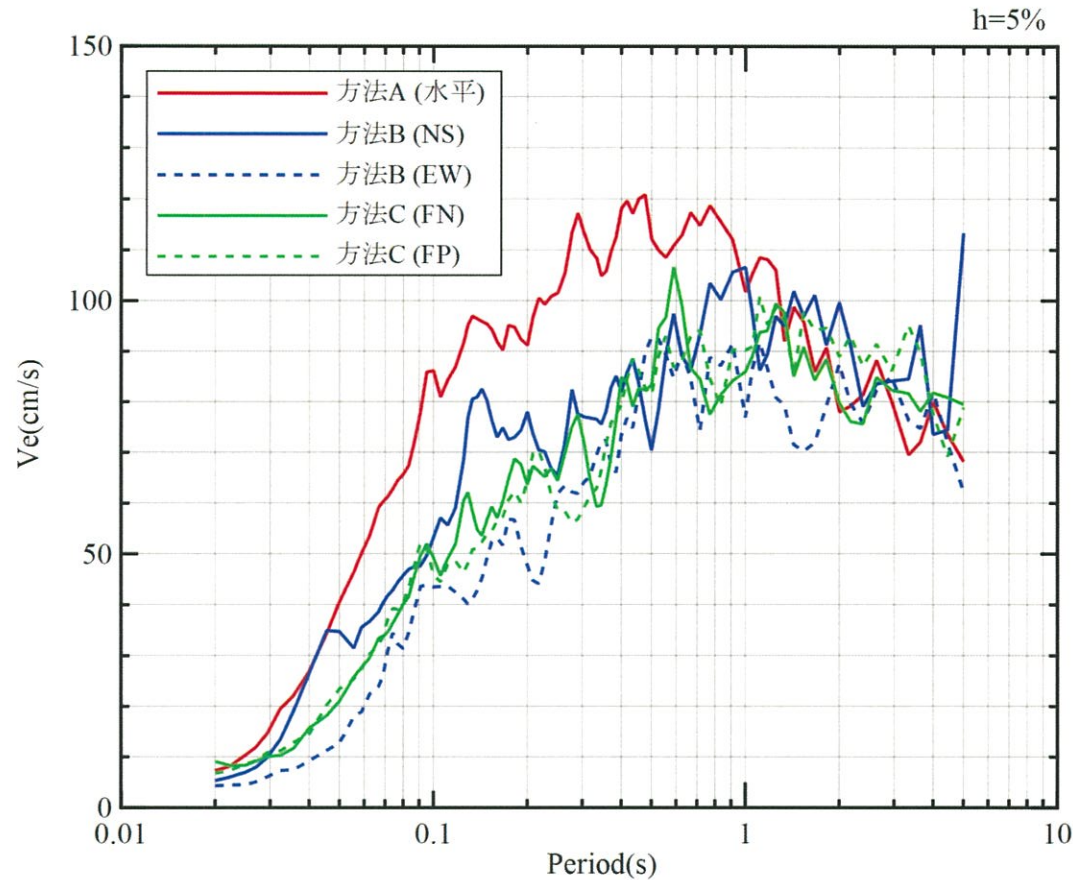
運動エネルギー - 減衰エネルギー - 歪エネルギー - 地震入力エネルギー

地震入力エネルギー
$$E = - \int_0^{t_n} M\ddot{x}_0 \dot{x} dt = \frac{1}{2} M V_E^2$$



【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 前頁に基づき算出した地震入力エネルギースペクトルは、短周期側（1秒程度以下）において、方法Aが方法B及び方法Cより大きい。

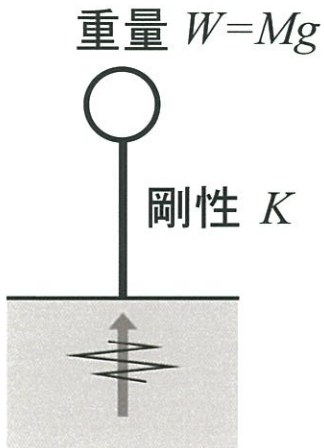


方法A～Cに基づく模擬地震波の入力エネルギースペクトル

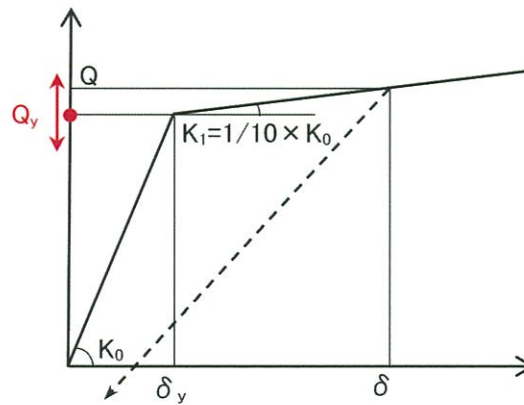
【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

③ 弾塑性応答スペクトル

- 弾塑性1質点系モデルを用い、塑性率 μ が所定の値($\mu=1\sim 4$)になるように、降伏せん断力 Q_y を算出。
- 算出した降伏せん断力 Q_y を重量 W で除して降伏せん断力係数 C を算出。
- これを周期 T ごとに繰り返し、周期 T と降伏せん断力係数 C の関係を示したものが弾塑性応答スペクトル。



弾塑性1質点系モデル



バイリニア型(最大点指向型)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{Kg}}$$

$$C = \frac{Q_y}{W}$$

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y}$$

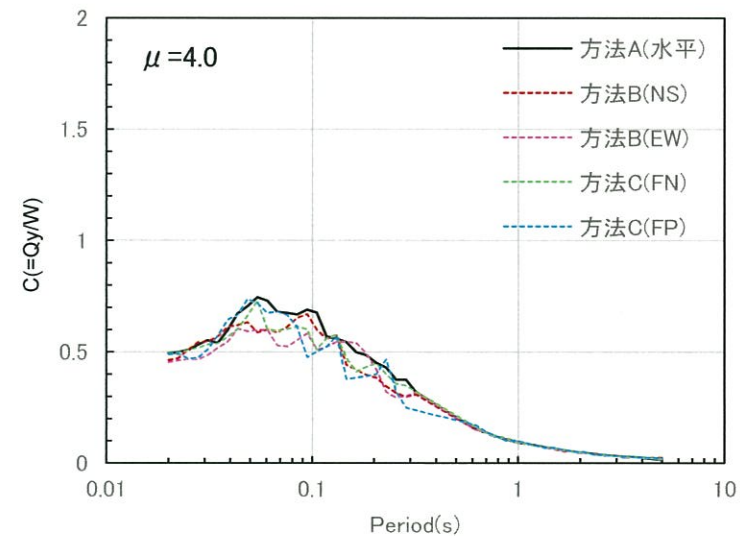
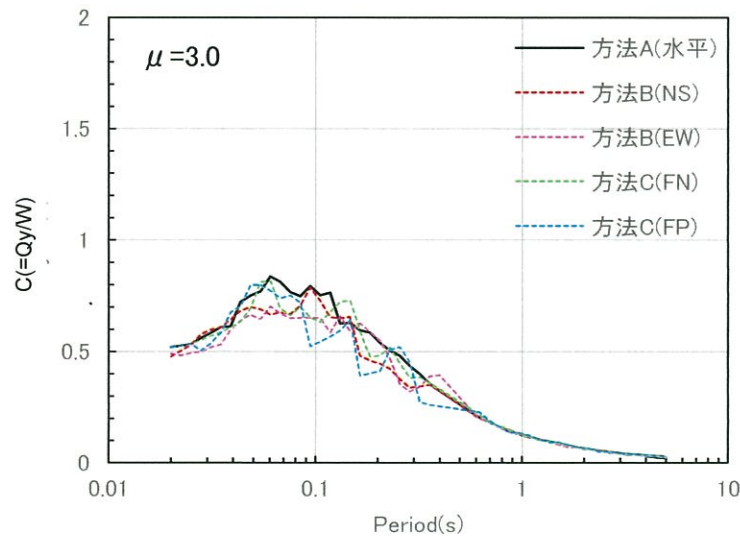
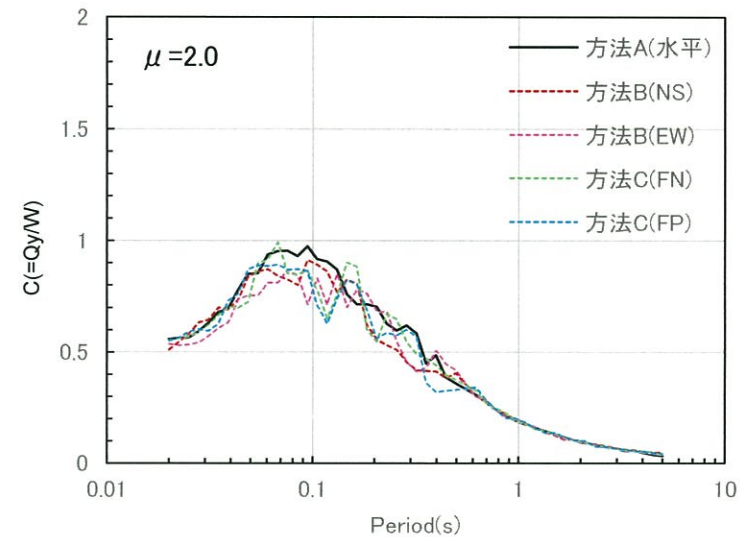
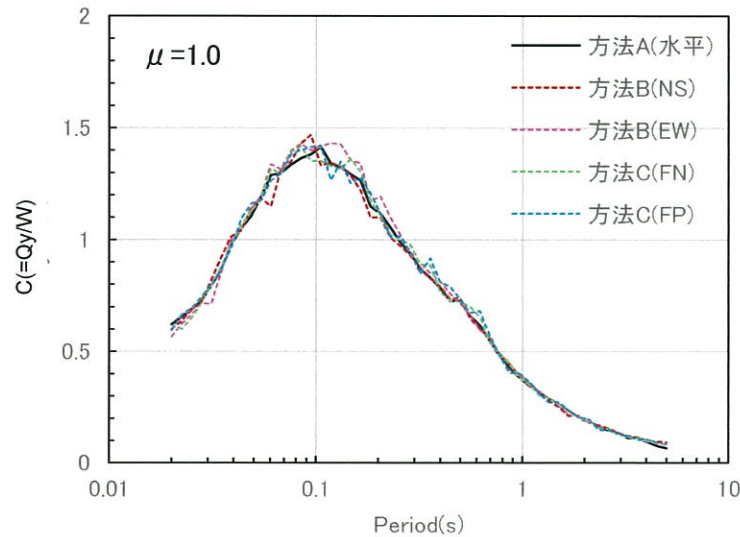
塑性率が μ が所定の値となるような降伏せん断力 Q_y を算出

降伏せん断力 Q_y を重量 W で除して降伏せん断力係数 C を算出

周期 T に応じて算出

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

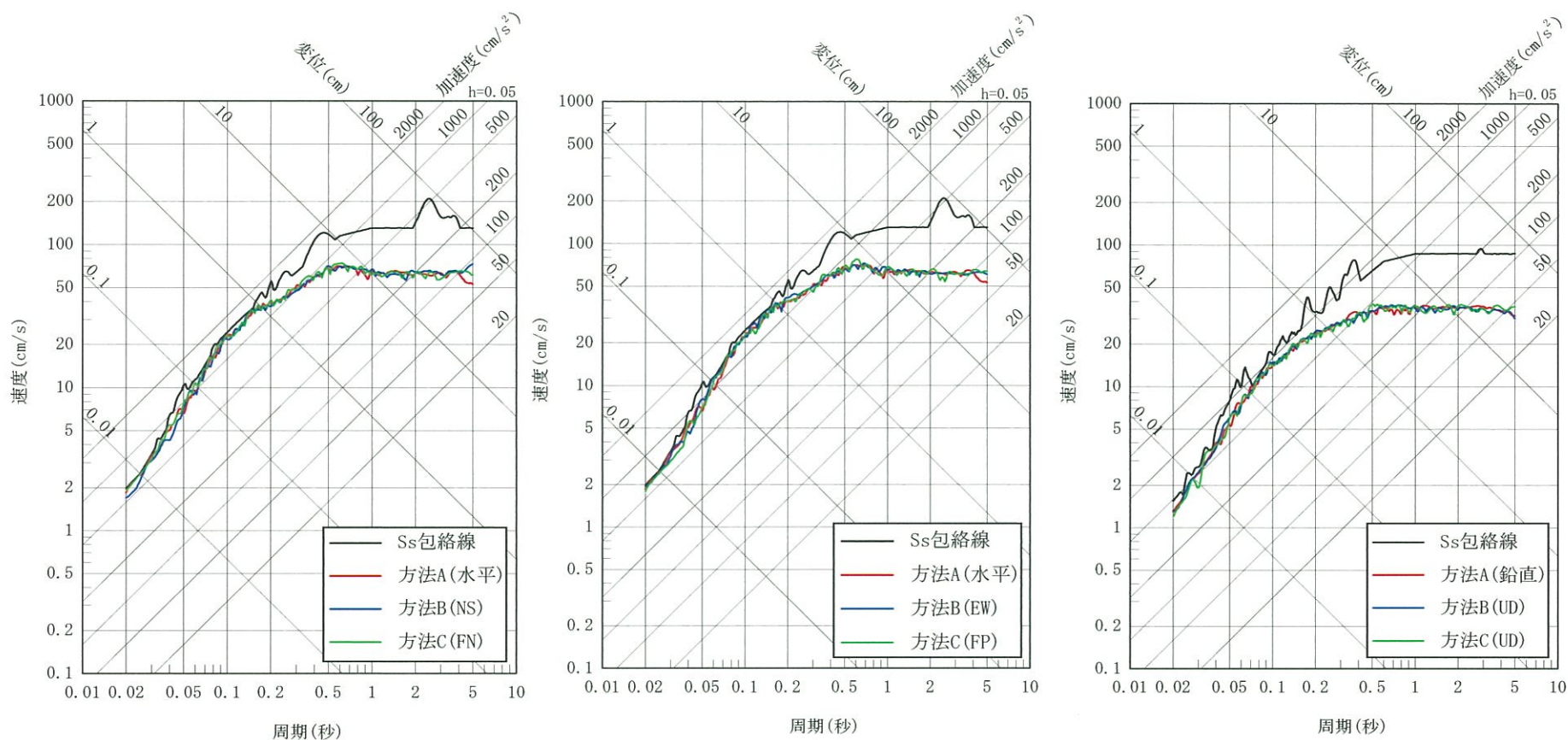
- 前頁に基づき算出した弾塑性応答スペクトルは、塑性率が大きくなるにつれ、短周期側（1秒程度以下）において、方法Aが方法B及び方法Cより大きい傾向。



方法A～Cに基づく模擬地震波の弾塑性応答スペクトル

【参考2】複数の方法による模擬地震波の検討

- 前頁までの検討（①～③）によると、方法B及び方法Cに基づき作成した模擬地震波に比べ、方法Aに基づき作成した模擬地震波のほうが優位性が確認される。
- なお、方法A～Cに基づき作成した模擬地震波を用いて解放基盤表面における地震動を設定した結果、いずれも現行の基準地震動に包絡されることを確認した。



水平方向

鉛直方向

方法A～Cに基づく解放基盤表面の応答スペクトルと基準地震動の応答スペクトル

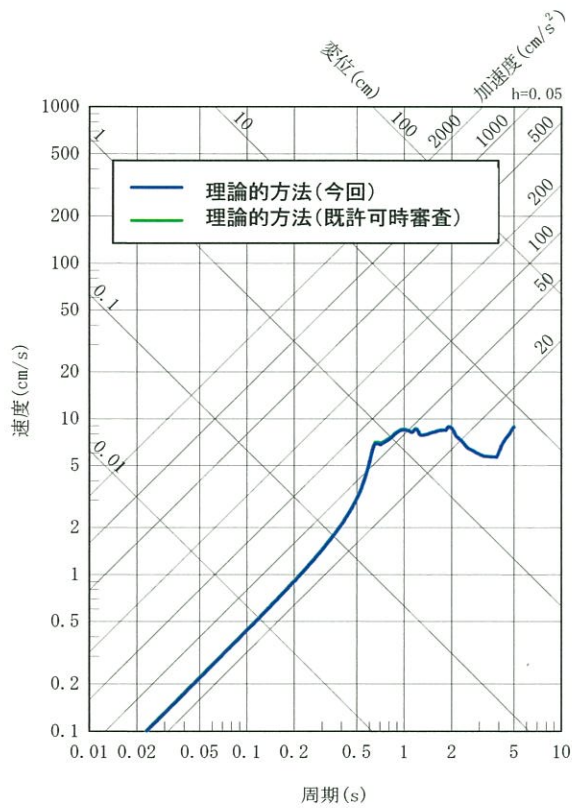
【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 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」の影響評価を実施。
 - 現行の基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 は、経験的グリーン関数法による地震動評価結果を採用しているが、長周期帯においては理論的方法による地震動評価も実施。
 - ⇒ 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(66、67頁参照)。
 - 既許可時審査においては、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(68、69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(70、71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。

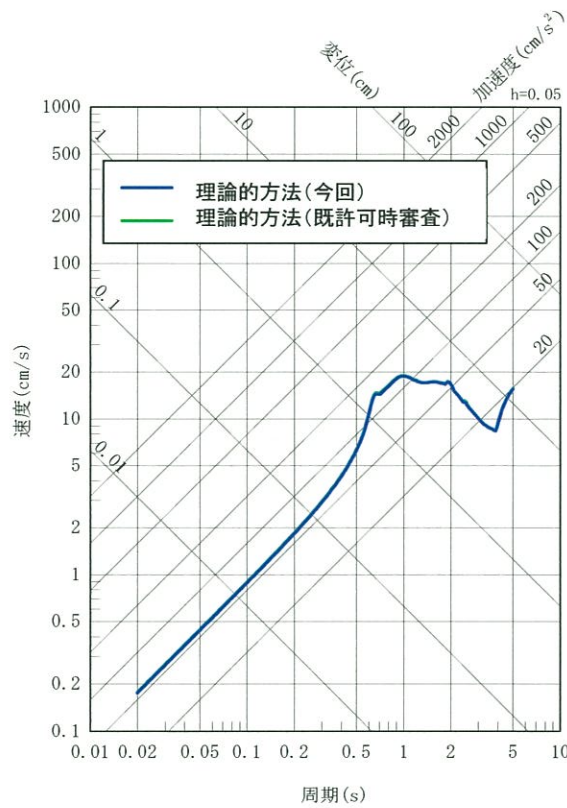
【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 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。

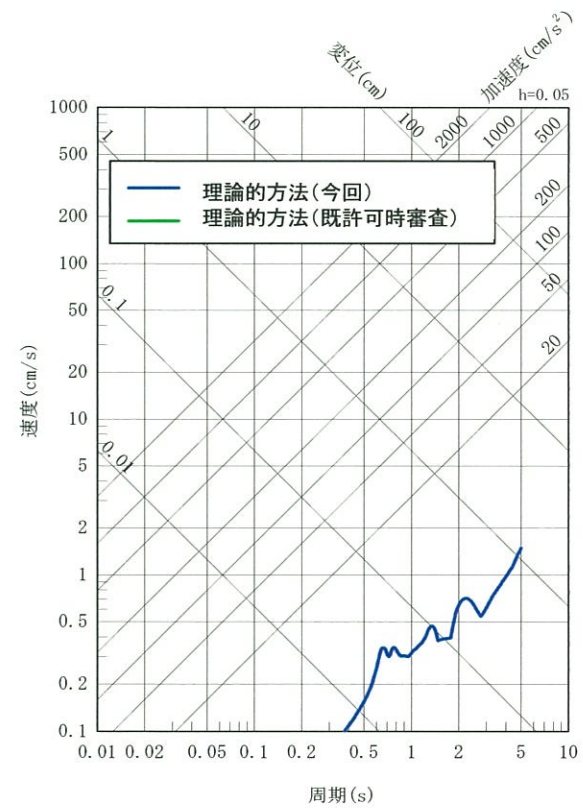
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



NS方向



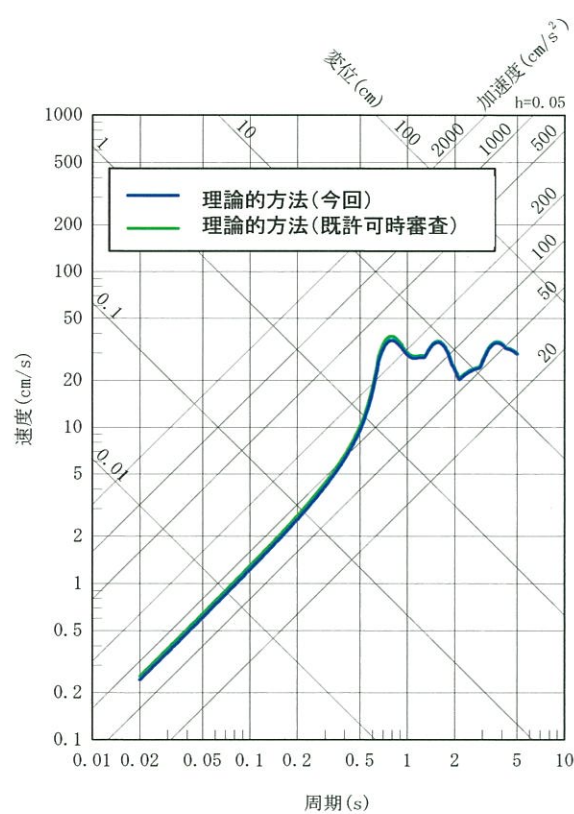
EW方向



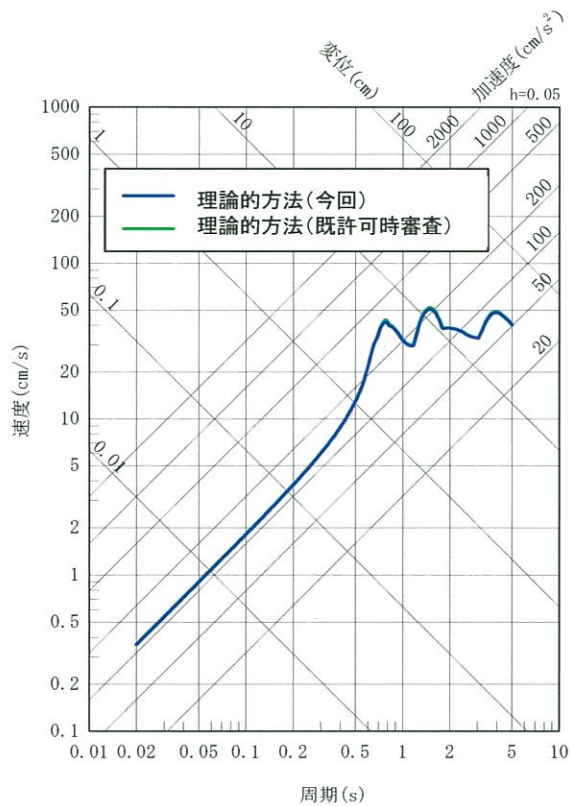
UD方向

【参考3】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

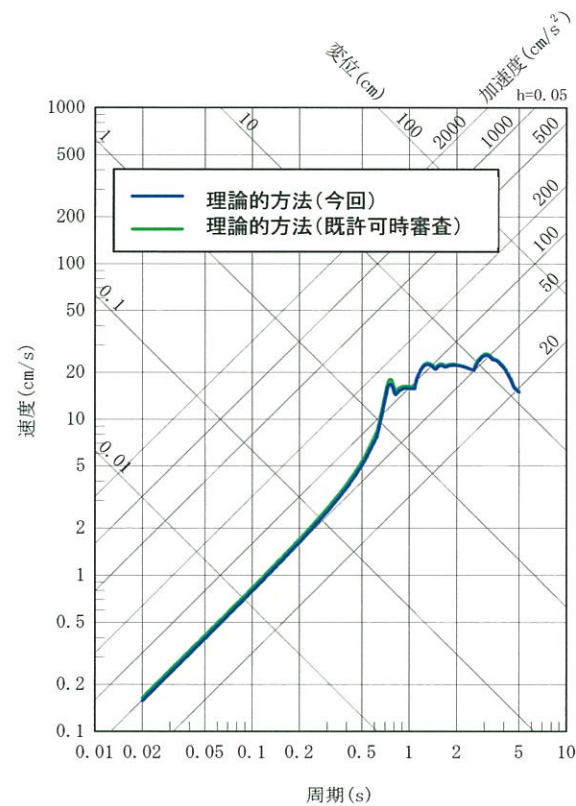
「城山南断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



NS方向



EW方向



UD方向

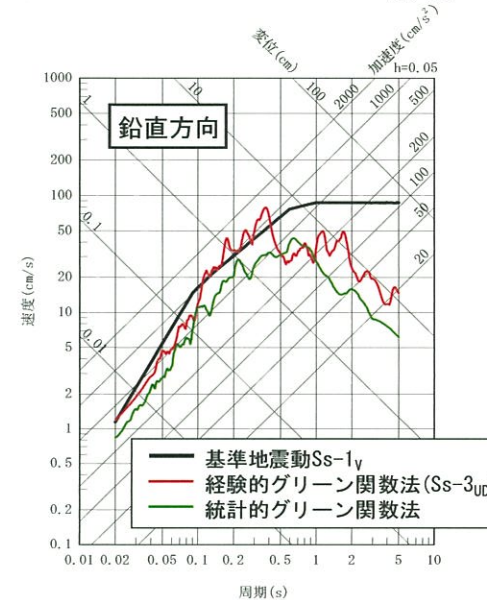
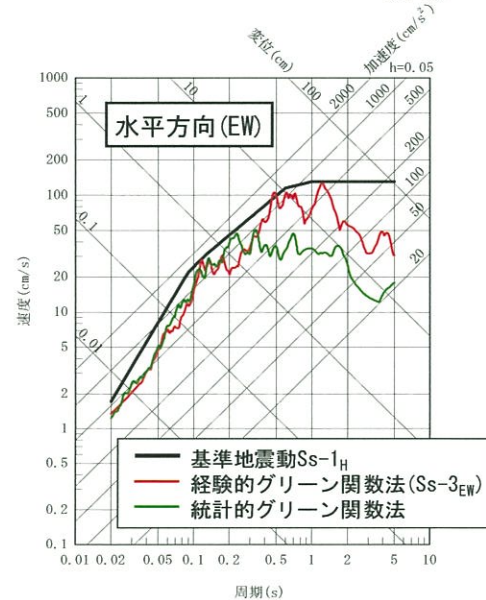
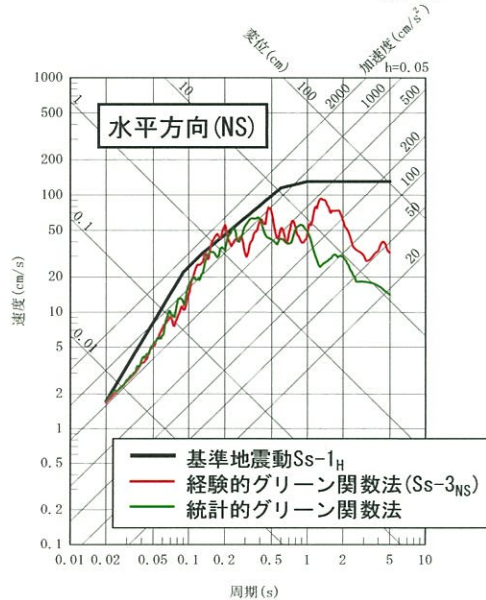
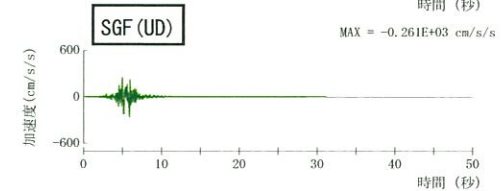
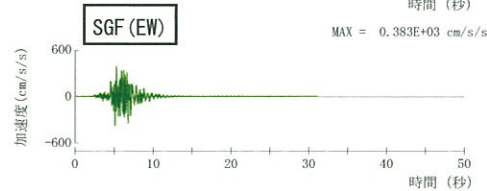
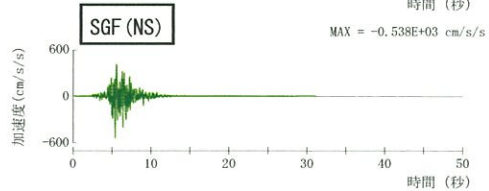
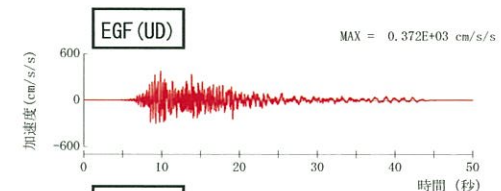
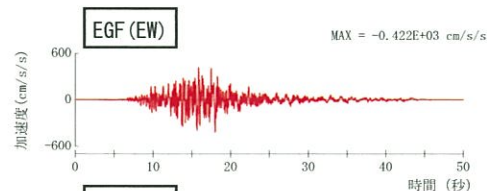
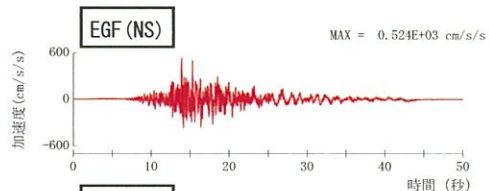
【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

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

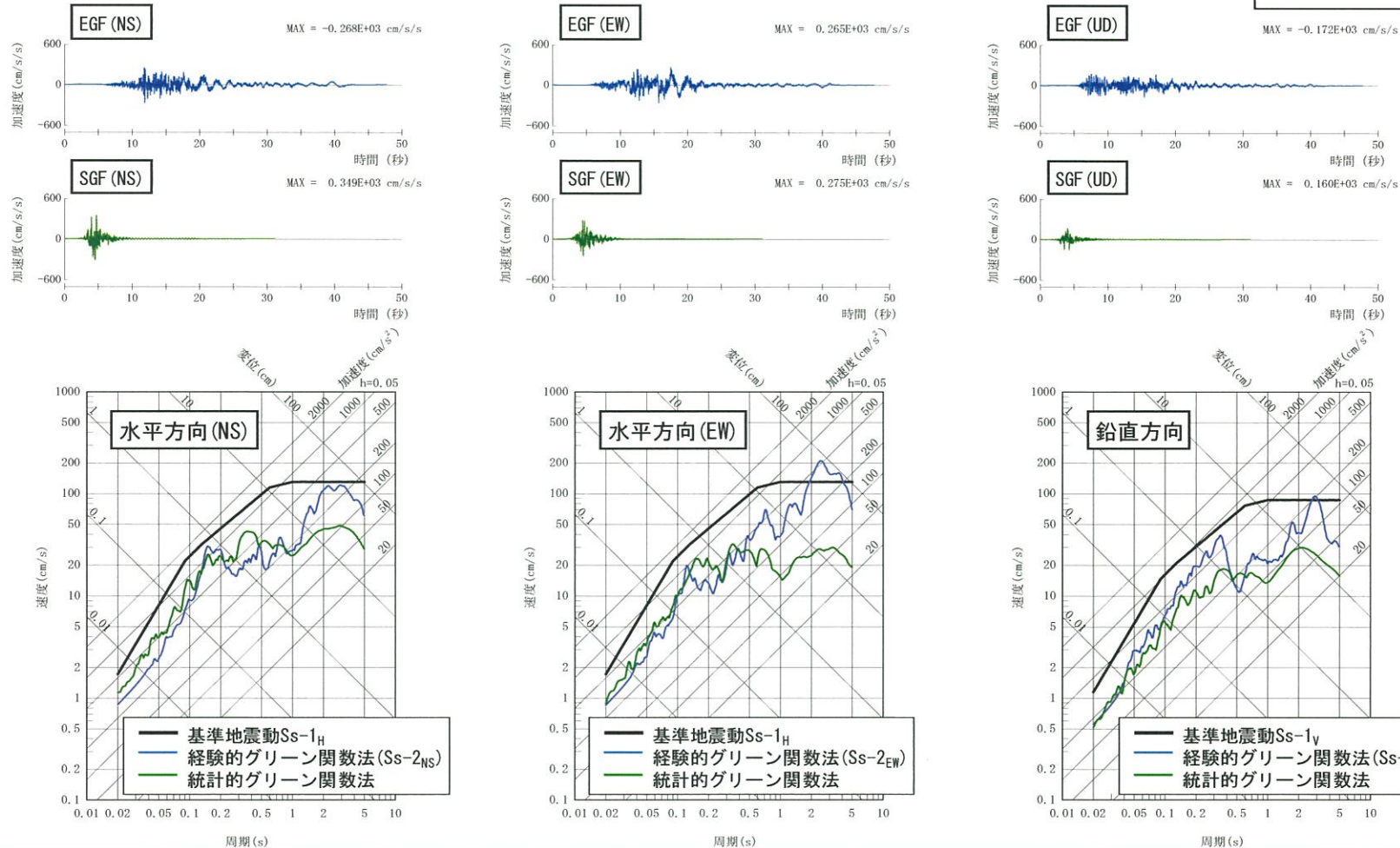
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



【参考3】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

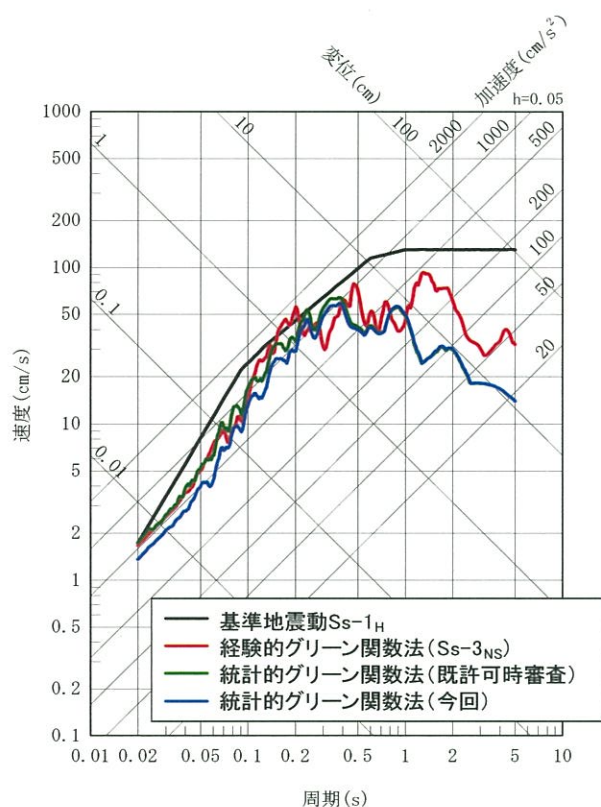


- P137に示した観測記録のフーリエ振幅スペクトルと理論スペクトルの傾向と同様、経験的グリーン関数法による評価結果は、低振動数側（長周期側）において、統計的グリーン関数法による評価結果を上回る。
- なお、統計的グリーン関数法による評価結果は、基準地震動Ss-1に包絡される結果となった。

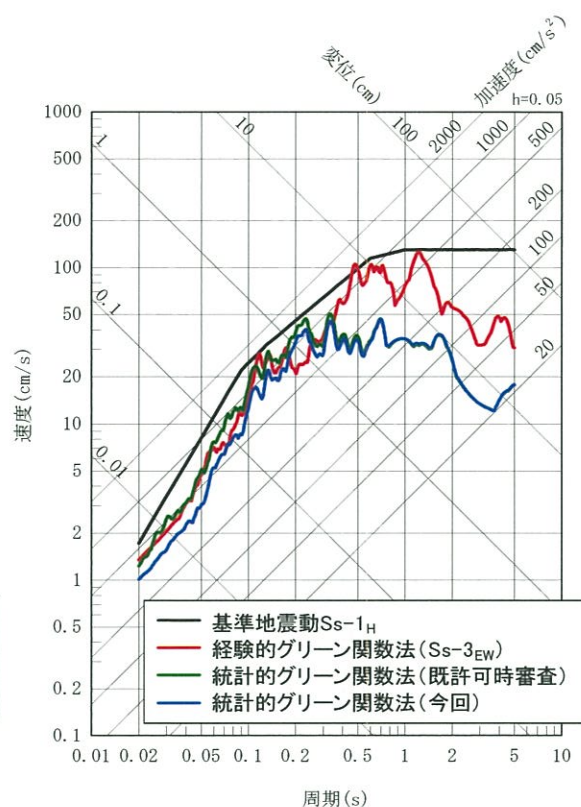
【参考3】敷地ごとに震源を特定して策定する地震動への影響評価

- 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。

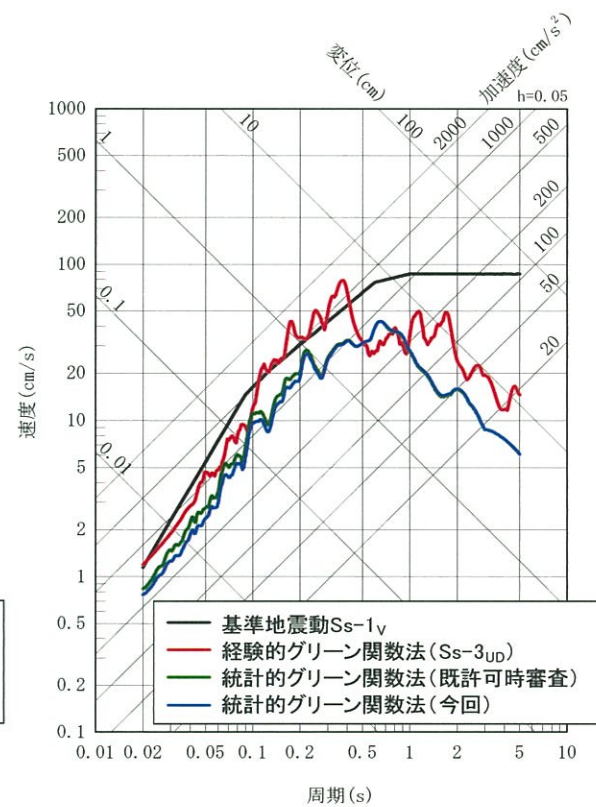
「竹木場断層による地震」：断層傾斜角の不確かさを考慮したケース



NS方向



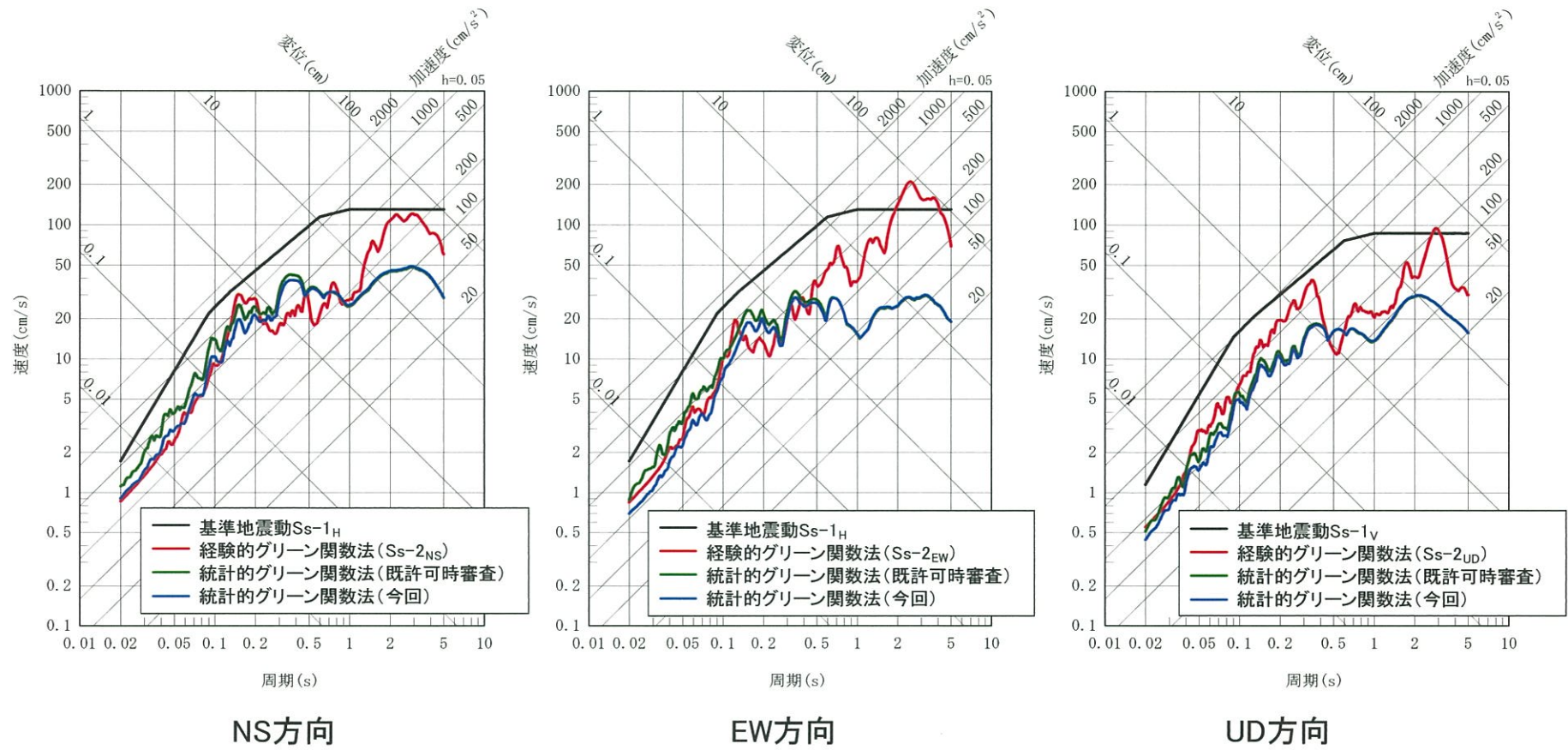
EW方向



UD方向

【参考3】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



参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 友澤裕介、加藤研一、中尾隆、本村一成、赤司二郎(2019): 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。
- 5) 中尾隆、本村一成、赤司二郎、友澤裕介、加藤研一(2019): 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。
- 6) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書、令和元年8月7日。
- 7) 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.
- 8) 加藤研一、武村雅之、八代和彦(1998): 強震記録から評価した短周期震源スペクトルの地域性, 地震第2輯、51巻、123–138.
- 9) 震源を特定せず策定する地震動に関する検討チーム(2019): 全国共通に考慮すべき「震源を特定せず策定する地震動」に関する検討報告書 参考資料 標準応答スペクトルに係る検討について、令和元年8月7日。
- 10) 日本電気協会(2015): 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601–2015.
- 11) 壇一男、具典淑、武藤真菜美(2010): 地表の短い活断層から想定される地中の震源断層のモデル化と強震動の試算、日本建築学会構造系論文集、第75巻 第648号、279–288、2010年2月。
- 12) 佐藤智美・岡崎敦(2013): 地震動の経験的経時特性モデルへの破壊伝播補正モデルと周期間相関モデルの導入、日本建築学会構造系論文集、第78巻 第684号、289–298、2013年2月。
- 13) 水谷浩之、西村功、敦賀隆史、荻原実、柏崎琢也、真下貢(2008): 平成19年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の観測記録に基づく揺れの強さ指標の比較(最大加速度振幅、SI値及び累積絶対速度CAV値)、日本建築学会大会学術講演梗概集、21508、2008年9月。

原 発 本 第 1 5 号
令 和 3 年 4 月 2 6 日

原子力規制委員会 殿

九州電力株式会社
代表取締役 社長執行役員
池 辺 和 弘

玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉
基準地震動の変更が不要であることを説明する文書

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正に係る対応について（指示）に基づき、下記のとおり、玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉について、基準地震動の変更が不要であることを説明する文書を提出いたします。

記

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正（令和 3 年 4 月 21 日 原子力規制委員会決定）に伴い、添付資料のとおり、玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉における震源を特定せず策定する地震動として標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定した結果、現行の基準地震動に包絡されることを確認した。

このため、玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉については、改正後の解釈を適用しても基準地震動を変更する必要がないと考える。

以上

九州電力株式会社 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の確認結果

1. 概要

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正により、震源を特定せず策定する地震動のうち全国共通に考慮すべき地震動の策定に当たっては、「震源近傍の多数の地震動記録に基づいて策定した地震基盤相当面における標準応答スペクトル」（以下「標準応答スペクトル」という。）を用いることが新たに規定された。

本資料では、まず、平成 29 年 1 月 18 日に設置変更許可を受けた玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉の基準地震動（以下「現行の基準地震動」という。）の概要及び標準応答スペクトルの概要を記載する。

次に、標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定し、標準応答スペクトルを考慮した地震動が現行の基準地震動に包絡されることを確認する。

2. 現行の基準地震動の概要

現行の基準地震動は、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動及び震源を特定せず策定する地震動について、玄海原子力発電所の解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動をそれぞれ策定している。

玄海原子力発電所の解放基盤表面は、原子炉格納容器及び原子炉周辺建屋基礎底板位置の EL. -15.0m とし、地震動評価上、解放基盤表面における S 波速度は、1.35km/s と設定している。

現行の基準地震動のうち、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動は、応答スペクトルに基づく地震動評価結果を包絡して設定した基準地震動 S_s-1 を策定している。また、城山南断層による地震及び竹木場断層による地震の断層モデルを用いた手法による地震動評価結果に基づき、基準地震動 S_s-2 及び S_s-3 を策定している。震源を特定せず策定する地震動は、2004 年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震動及び 2000 年鳥取県西部地震を考慮した地震動による基準地震動 S_s-4 及び S_s-5 を策定している。

現行の基準地震動の最大加速度を第 2-1 表に示す。

3. 標準応答スペクトルの概要

標準応答スペクトルは、過去の内陸地殻内地震の多数の地震動観測記録（Mw5.0～Mw6.5 程度）を対象として統計的な手法を用いた処理により算出した複数条件での応答スペクトルを踏まえ、設定されたものである。また、標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されている。

標準応答スペクトルの応答スペクトル値を第3-1表に示す。

4. 標準応答スペクトルを考慮した地震動の設定

標準応答スペクトルは、地震基盤相当面で定義されているため、基準地震動と比較する場合は、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映する必要がある。このため、標準応答スペクトルを基に、地震基盤相当面における模擬地震波を作成し、地下構造モデルを用いて解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定する。

4.1 地下構造モデルの設定

標準応答スペクトルを考慮した地震動の設定に用いる地下構造モデルのうち、層厚、密度、S波速度 V_s 及びP波速度 V_p については、既許可（平成29年1月18日許可）に示す、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」における断層モデルを用いた手法の長周期帯における理論的方法による評価に用いた地下深部構造モデル（以下「長周期帯の理論的方法に用いた地下構造モデル」という。）を参照する。長周期帯の理論的方法に用いた地下構造モデルを第4-1表に示す。

Q値については、敷地地盤における鉛直アレイ地震観測記録から求めた伝達関数に、一次元波動論に基づく理論伝達関数を当てはめる逆解析により同定したQ値及び地震波干渉法により推定したQ値に、不確かさを考慮して設定する。敷地地盤における地震観測点を第4-1図に示す。

地震基盤相当面は、標準応答スペクトルが定義される地盤のS波速度を踏まえ設定する。

4.1.1 伝達関数の逆解析によるQ値の同定

伝達関数の逆解析によるQ値の同定については、層厚、密度、S波速度 V_s 及びP波速度 V_p を第4-1表に示す長周期帯の理論的方法に用いる地下構造モデルにおける値を参照し、敷地地盤における鉛直アレイ地震観測記録から求めた伝達関数に、一元波動論に基づく理論伝達関数を当てはめる逆解析により、Q値を同定した。地震観測記録の伝達関数の逆解析に用いた観測地震の諸元を第4-2表、震央分布を第4-2図に示す。

地震観測記録に基づく平均伝達関数及び同定結果から計算される理論伝達関数を第4-3図、Q値の同定結果を第4-4図に示す。第4-3図には、長周期帯の理論的方法に用いる地下構造モデルから計算される理論伝達関数を実線で併記した。

4.1.2 地震波干渉法による Q 値の推定⁽¹⁾⁽²⁾

地震波干渉法による Q 値の推定については、地下構造モデルを介さず、鉛直アレイ地震観測記録から減衰を直接推定可能である。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される。この入射波に対する反射波の振幅の比率に基づき、Q 値を推定した。地震波干渉法による Q 値の推定は、第 4-2 表及び第 4-2 図に示した観測地震を対象に検討した。

地震波干渉法による Q 値の推定結果を第 4-5 図に示す。

4.1.3 地震基盤相当面の設定

地震基盤相当面は、標準応答スペクトルが定義される地盤の S 波速度を踏まえ、第 4-1 表に示す、地下構造モデルの S 波速度 2.10 km/s の層上面である EL. -200m として設定する。

以上を踏まえ、標準応答スペクトルを考慮した地震動の設定に用いる地下構造モデルを設定する。Q 値は、「4.1.1 伝達関数の逆解析による Q 値の同定」及び「4.1.2 地震波干渉法による Q 値の推定」を踏まえ、不確かさを考慮して 12.5 と設定する。

標準応答スペクトルを考慮した地震動の設定に用いる解放基盤表面以深の地下構造モデルを第 4-3 表に示す。

4.2 模擬地震波の作成

地震基盤相当面における模擬地震波は、標準応答スペクトルに適合するよう、一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせによって作成する。振幅包絡線の経時的変化については、Noda et al. (2002)⁽³⁾に基づき、第 4-4 表に示す形状とする。地震基盤相当面における模擬地震波の作成結果を第 4-5 表、標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比を第 4-6 図、時刻歴波形を第 4-7 図に示す。

4.3 解放基盤表面における地震動の作成

「4.2 模擬地震波の作成」において作成した模擬地震波を用い、第4-3表に示す地下構造モデルを用いた次元波動論により解放基盤表面における標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定する。設定した標準応答スペクトルを考慮した地震動の時刻歴波形を第4-8図、最大加速度を第4-6表に示す。

5. 標準応答スペクトルを考慮した地震動と現行の基準地震動の比較

標準応答スペクトルを考慮した地震動と現行の基準地震動の応答スペクトルの比較を第5-1図～第5-3図に示す。第5-1図～第5-3図より、標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトルは、現行の基準地震動の応答スペクトルに包絡されることを確認した。

6. まとめ

以上のとおり、実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈等の一部改正に伴い、3号炉及び4号炉における震源を特定せず策定する地震動として標準応答スペクトルを考慮した地震動を設定した結果、現行の基準地震動に包絡されることを確認した。

【参考文献】

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.

第2-1表 現行の基準地震動の最大加速度

基準地震動				最大加速度 (cm/s ²)
応答スペクトルに基づく手法による基準地震動 Ss-1	設計用模擬地震波	水平方向	Ss-1 _H	540
		鉛直方向	Ss-1 _V	360
断層モデルを用いた手法による基準地震動 Ss-2 及び Ss-3	城山南断層による地震	水平方向 NS 成分	Ss-2 _{NS}	268
		水平方向 EW 成分	Ss-2 _{EW}	265
		鉛直方向 UD 成分	Ss-2 _{UD}	172
	竹木場断層による地震	水平方向 NS 成分	Ss-3 _{NS}	524
		水平方向 EW 成分	Ss-3 _{EW}	422
		鉛直方向 UD 成分	Ss-3 _{UD}	372
震源を特定せず策定する地震動による基準地震動 Ss-4 及び Ss-5	2004年北海道留萌支庁南部地震を考慮した地震波	水平方向	Ss-4 _H	620
		鉛直方向	Ss-4 _V	320
	2000年鳥取県西部地震を考慮した地震波	水平方向 NS 成分	Ss-5 _{NS}	528
		水平方向 EW 成分	Ss-5 _{EW}	531
		鉛直方向 UD 成分	Ss-5 _{UD}	485

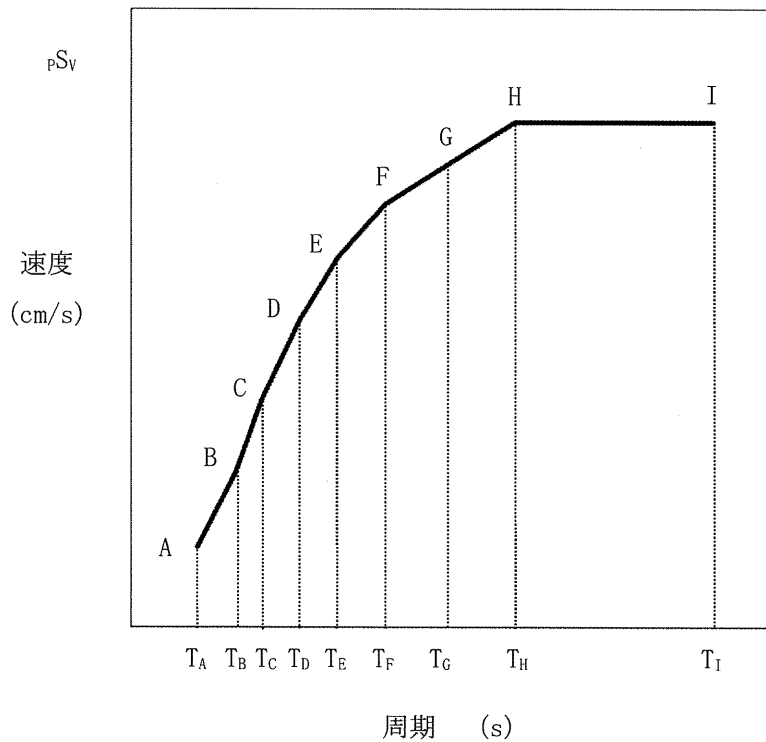
第3-1表 標準応答スペクトルの応答スペクトル値

標準応答 スペクトル	コントロールポイント									
	A		B		C		D		E	
	T_A	pS_V	T_B	pS_V	T_C	pS_V	T_D	pS_V	T_E	pS_V
水平	0.02	1.910	0.03	3.500	0.04	6.300	0.06	12.000	0.09	20.000
鉛直	0.02	1.273	0.03	2.500	0.04	4.400	0.06	7.800	0.09	13.000

標準応答 スペクトル	コントロールポイント							
	F		G		H		I	
	T_F	pS_V	T_G	pS_V	T_H	pS_V	T_I	pS_V
水平	0.15	31.000	0.30	43.000	0.60	60.000	5.00	60.000
鉛直	0.15	19.000	0.30	26.000	0.60	35.000	5.00	35.000

注) $T_A \sim T_I$ は周期 (s)

pS_V は速度 (cm/s)



擬似速度応答スペクトル

第 4-1 表 長周期帯の理論的方法に用いた地下構造モデル

層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Q 値
35	2.35	3.00	1.35	100
50	2.35	3.44	1.57	100
50	2.35	3.47	1.73	100
50	2.35	3.65	1.77	100
1,604	2.40	4.00	2.10	200
1,211	2.60	5.50	3.10	300
17,000	2.70	5.90	3.50	300
13,000	3.00	6.60	3.80	500
—	3.30	7.60	4.30	500

第4-2表 検討に用いた観測地震の諸元

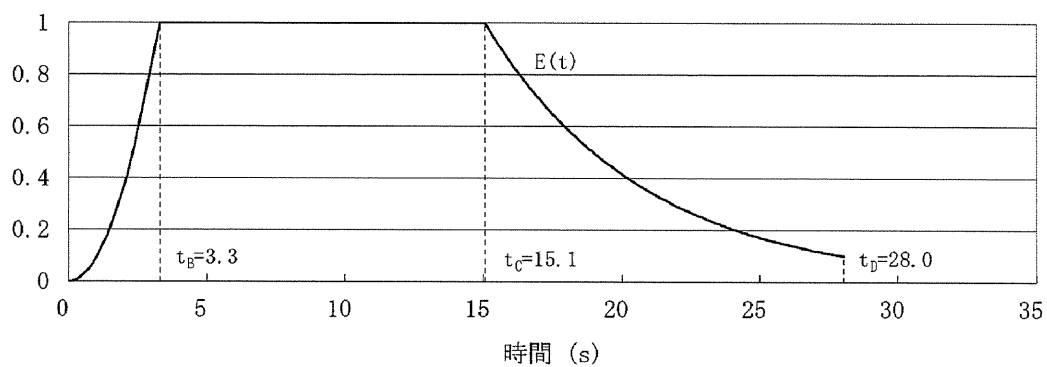
No.	年月日	震央位置		マグニチュード M	震央距離 (km)	地名
		北緯	東経			
1	1997. 3. 26	31° 58. 37'	130° 21. 54'	6. 6	178	鹿児島県北西部
2	1997. 4. 3	31° 58. 22'	130° 19. 32'	5. 7	178	鹿児島県北西部
3	1997. 5. 13	31° 56. 90'	130° 18. 16'	6. 4	179	鹿児島県北西部
4	1997. 6. 25	34° 26. 49'	131° 39. 97'	6. 6	198	山口県
5	2005. 3. 20	33° 44. 35'	130° 10. 58'	7. 0	40	九州北西沖
6	2005. 3. 22	33° 43. 52'	130° 10. 61'	5. 4	39	九州北西沖
7	2005. 4. 20	33° 40. 69'	130° 17. 29'	5. 8	46	福岡県中部
8	2016. 4. 14	32° 44. 50'	130° 48. 52'	6. 5	125	熊本県熊本地方
9	2016. 4. 14	32° 46. 53'	130° 50. 97'	5. 8	126	熊本県熊本地方
10	2016. 4. 15	32° 42. 04'	130° 46. 66'	6. 4	126	熊本県熊本地方
11	2016. 4. 16	32° 45. 27'	130° 45. 78'	7. 3	121	熊本県熊本地方
12	2016. 4. 16	32° 45. 19'	130° 45. 69'	5. 4	121	熊本県熊本地方
13	2016. 4. 16	32° 51. 79'	130° 53. 94'	5. 9	123	熊本県熊本地方
14	2016. 4. 16	32° 57. 83'	131° 05. 21'	5. 9	132	熊本県阿蘇地方
15	2016. 4. 16	33° 01. 59'	131° 11. 46'	5. 8	138	熊本県阿蘇地方
16	2016. 4. 16	32° 50. 82'	130° 50. 10'	5. 4	119	熊本県熊本地方
17	2016. 4. 16	32° 41. 95'	130° 43. 20'	5. 4	123	熊本県熊本地方
18	2016. 4. 18	33° 00. 12'	131° 11. 99'	5. 8	140	熊本県阿蘇地方
19	2016. 4. 19	32° 32. 11'	130° 38. 12'	5. 5	132	熊本県熊本地方

第4-3表 標準応答スペクトルを考慮した地震動の設定
に用いる解放基盤表面以深の地下構造モデル

層厚 (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (km/s)	Vs (km/s)	Q 値
35	2.35	3.00	1.35	12.5
50	2.35	3.44	1.57	12.5
50	2.35	3.47	1.73	12.5
50	2.35	3.65	1.77	12.5
—	2.40	4.00	2.10	200

第4-4表 標準応答スペクトルに基づく地震基盤相当面における
模擬地震波の振幅包絡線の経時的变化

標準応答 スペクトル	継続時間 (s)	振幅包絡線の経時的变化(s)		
		t_B	t_C	t_D
水平	28.0	3.3	15.1	28.0
鉛直	28.0	3.3	15.1	28.0



$$t_B = 10^{0.5M-2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M-1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M+0.541\log X_{eq}-0.6}$$

$$M = 6.9, X_{eq} = 10 \text{ (km)}$$

第4-5表 標準応答スペクトルに基づく地震基盤相当面における
模擬地震波の作成結果

標準応答 スペクトル	作成条件	作成結果			
	応答スペクトル	最大加速度 (cm/s ²)	応答スペクトル比	継続時間	SI比
水平	第3-1表	600	第4-6図	第4-4表	1.00
鉛直	第3-1表	400	第4-6図	第4-4表	1.01

$$R(T) = \frac{S_{v1}(T)}{S_{v2}(T)} \geq 0.85 \quad (0.02 \leq T)$$

ただし、T：周期 (s)

$S_{v1}(T)$ ：模擬地震波の応答スペクトル値

$S_{v2}(T)$ ：目標とする応答スペクトル値

$$SI比 = \frac{\int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dt}{\int_{0.1}^{2.5} \bar{S}_v(T) dt} \geq 1.0$$

ただし、SI：応答スペクトル強さ

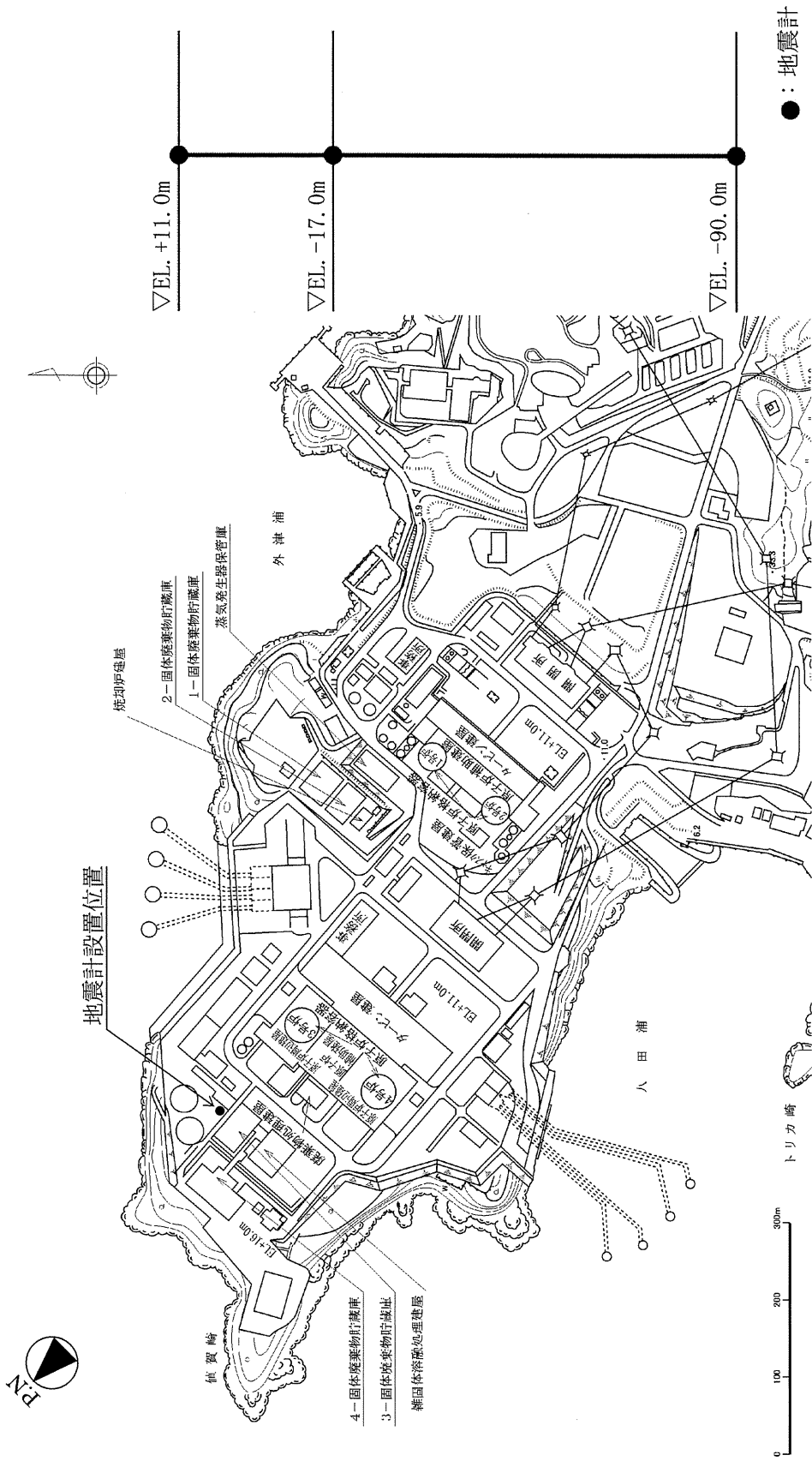
$S_v(T)$ ：模擬地震波の応答スペクトル(cm/s)

$\bar{S}_v(T)$ ：目標とする応答スペクトル(cm/s)

T：固有周期(s)

第 4-6 表 標準応答スペクトルを考慮した地震動の最大加速度

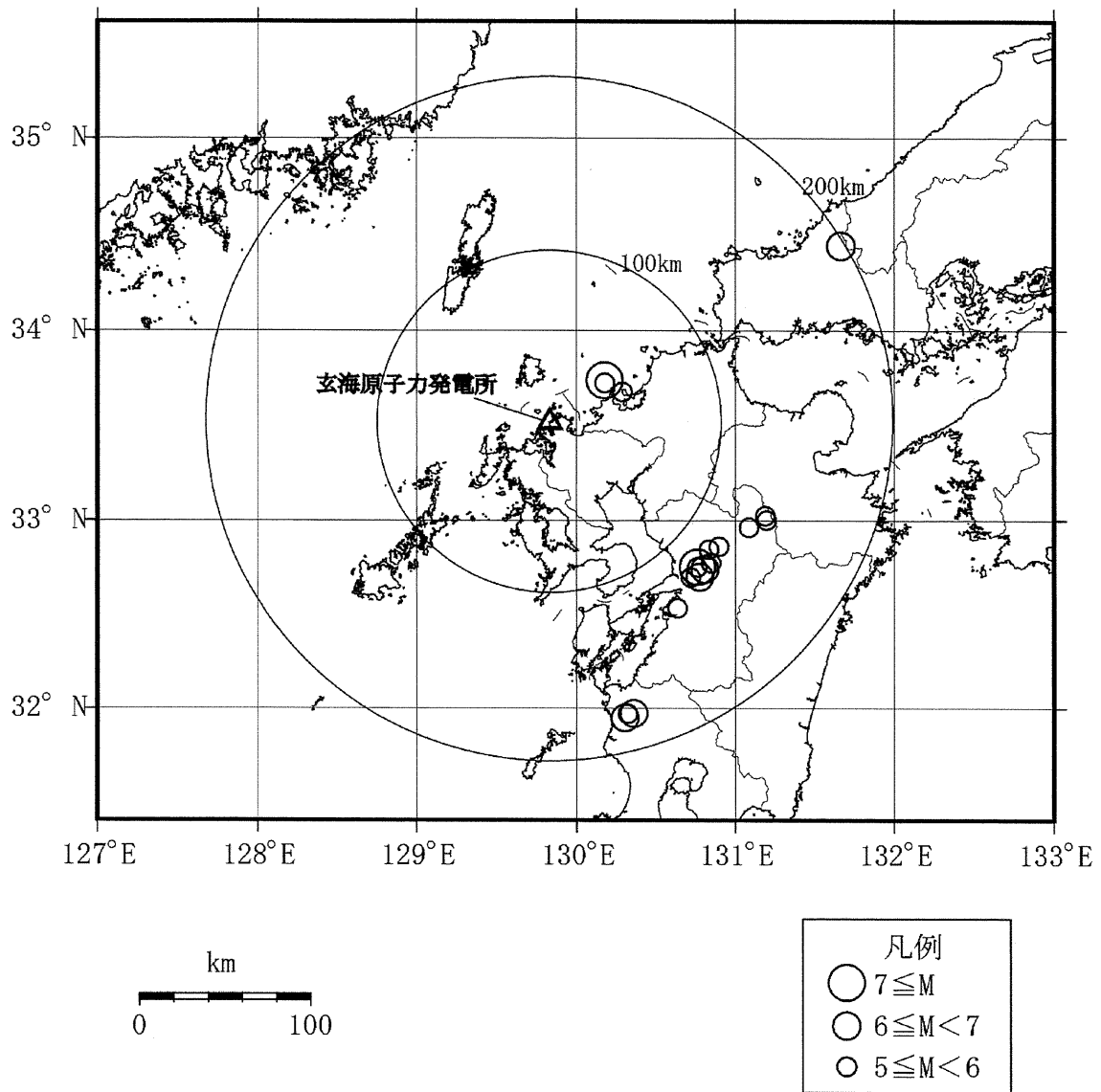
		最大加速度 (cm/s^2)
標準応答スペクトルを 考慮した地震波	水平方向	577
	鉛直方向	403



配置図

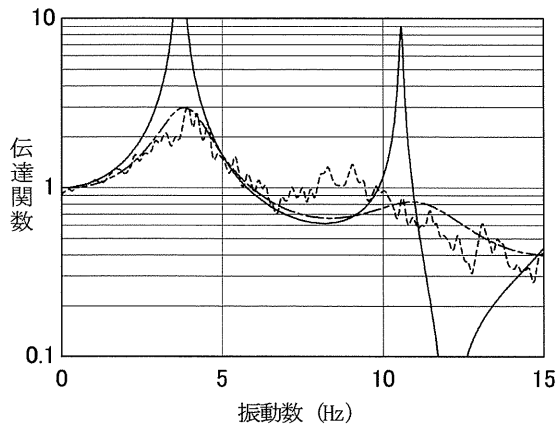
深さ方向の設置位置

第 4-1 図 地震観測点

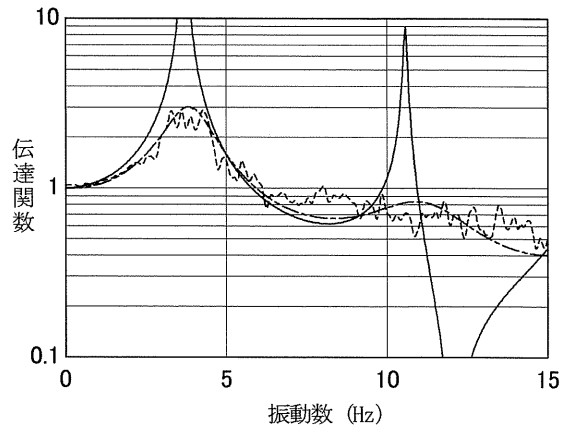


第4-2図 検討に用いた観測地震の震央分布

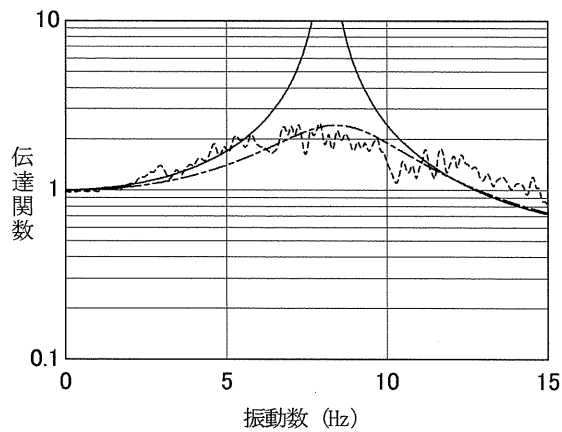
———: 理論伝達関数 (長周期帯の理論的方法に用いた地下構造モデル)
 - - - - : 理論伝達関数 (同定地下構造モデル)
 - - - - : 地震観測記録による伝達関数 (19地震の平均伝達関数)



(a) NS 方向



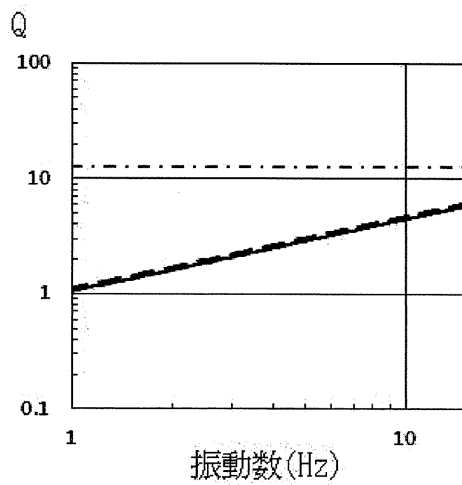
(b) EW 方向



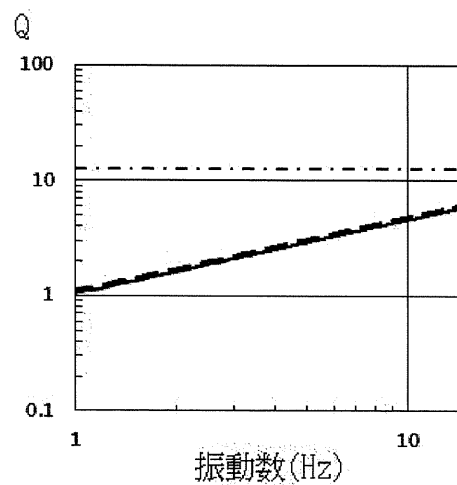
(c) UD 方向

第 4-3 図 地震観測記録に基づく平均伝達関数及び同定結果から計算される理論伝達関数 (EL. - 17m/EL. - 90m)

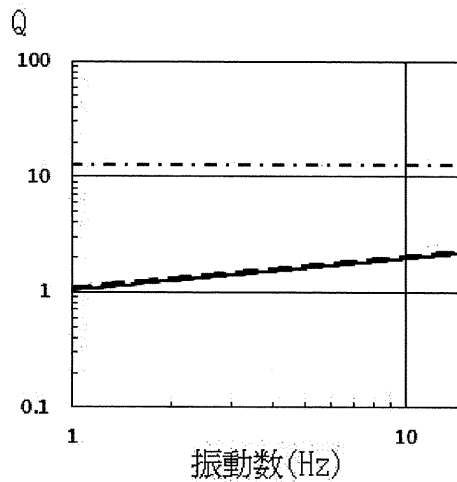
——	: Q 値の同定結果 (EL. -17m~EL. -50m)
----	: Q 値の同定結果 (EL. -50m~EL. -90m)
-----	: Q = 12.5



(a) NS 方向



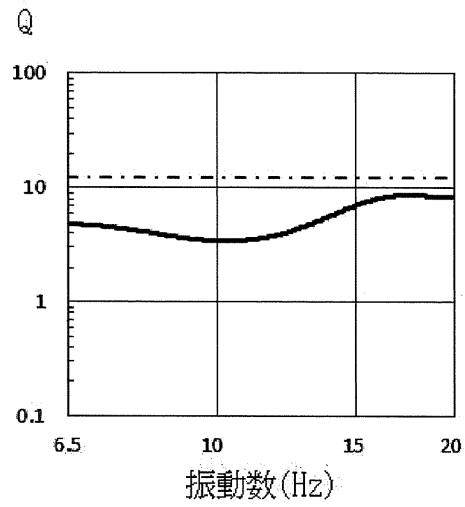
(b) EW 方向



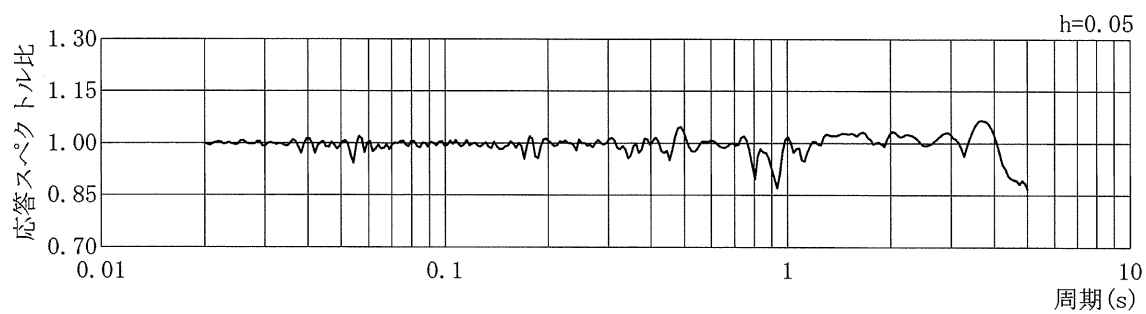
(c) UD 方向

第 4-4 図 伝達関数の逆解析による Q 値の同定結果

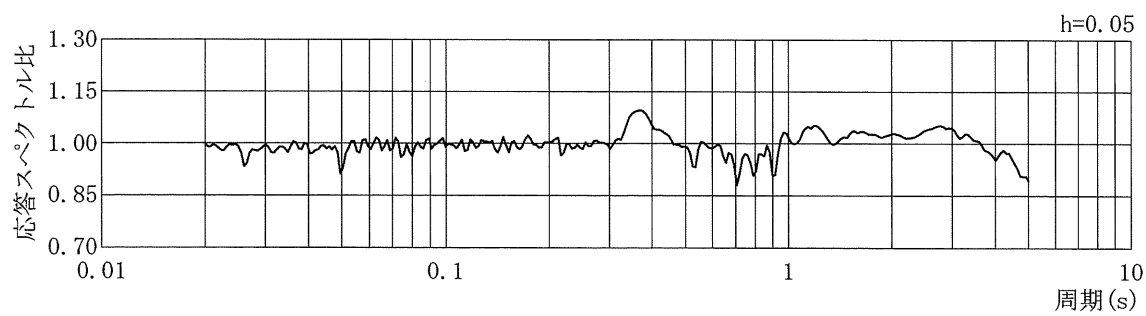
— : 地震波干渉法による Q 値の推定結果
 - - - : $Q = 12.5$



第 4-5 図 地震波干渉法による Q 値の推定結果

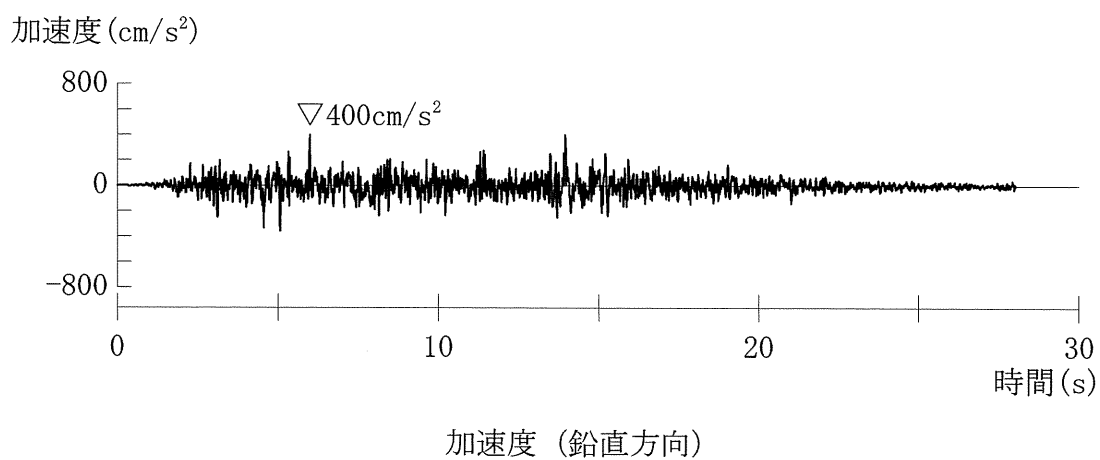
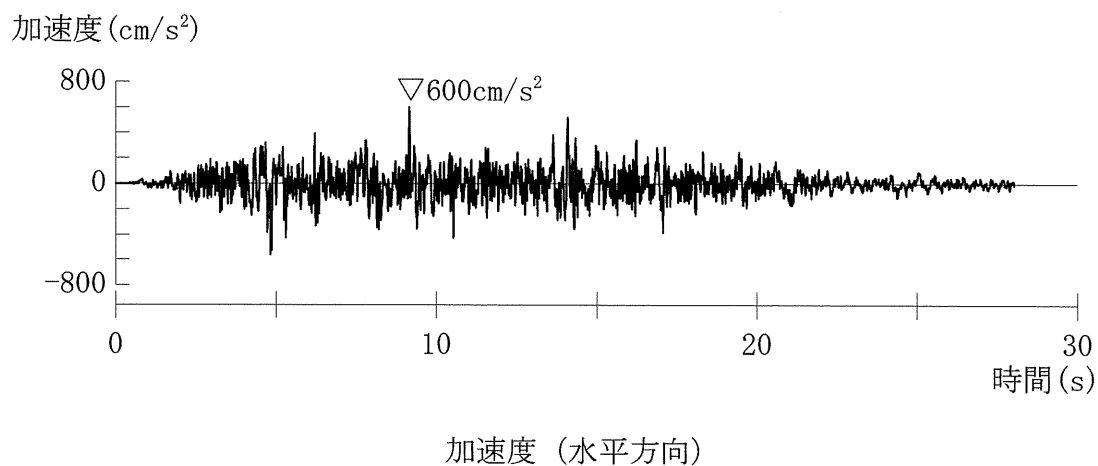


水平方向

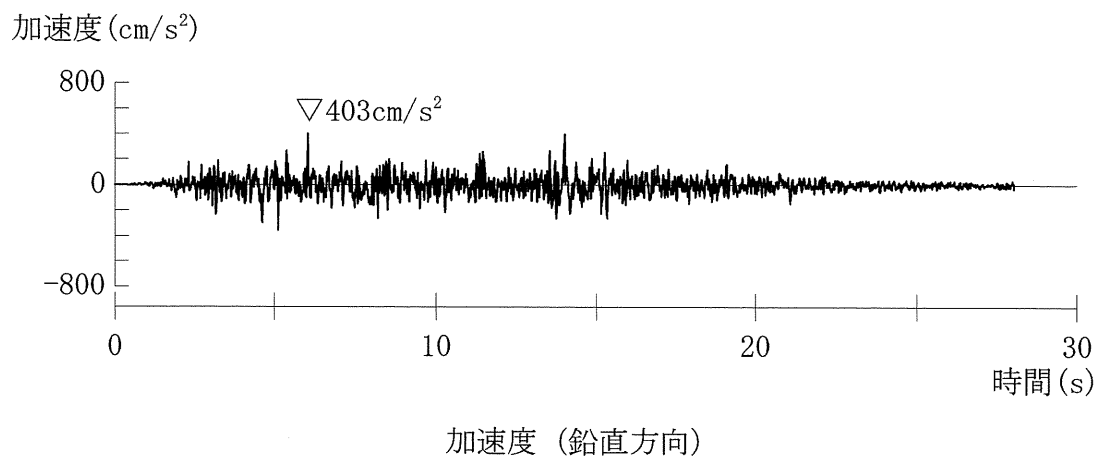
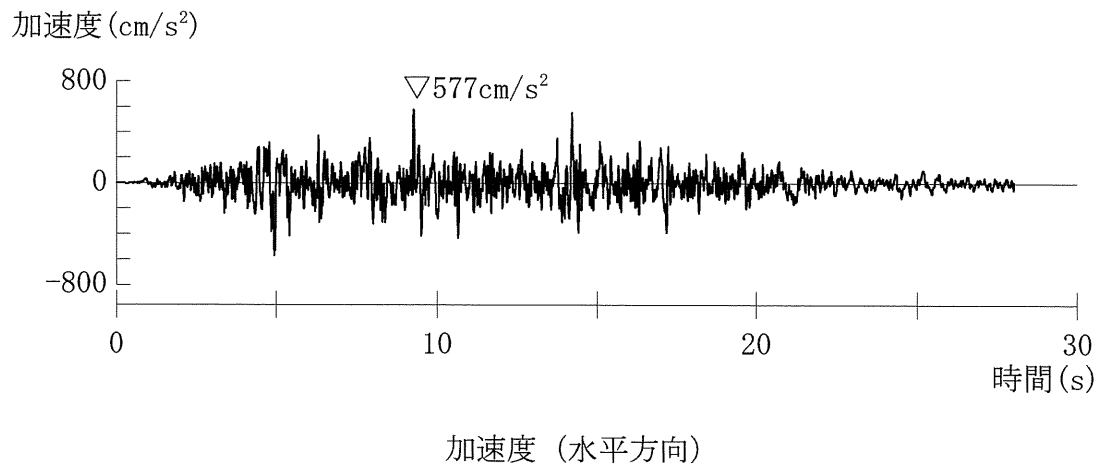


鉛直方向

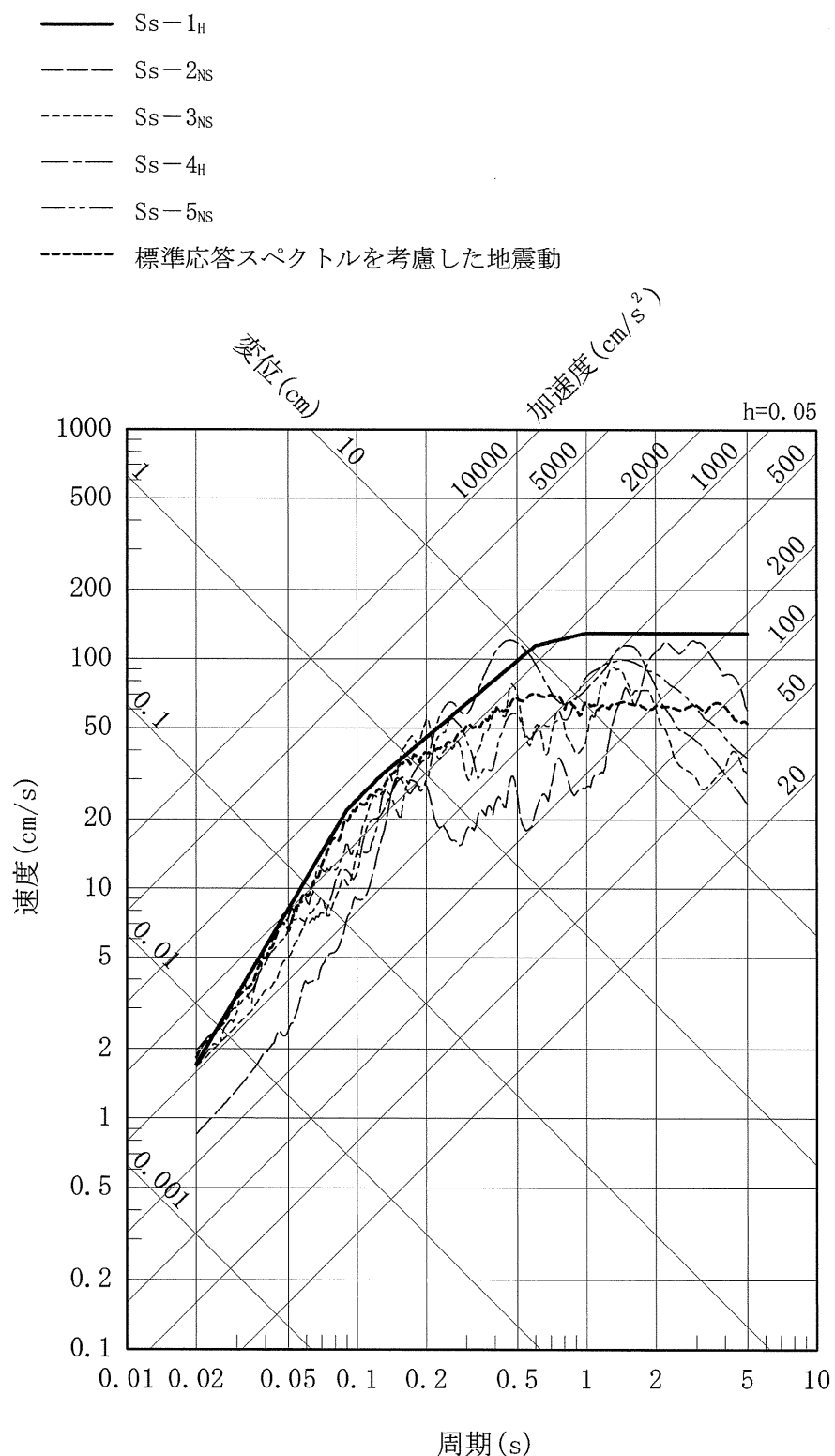
第4-6図 標準応答スペクトルに対する模擬地震波の応答スペクトル比



第4-7図 標準応答スペクトルに基づく地震基盤相当面における
模擬地震波の時刻歴波形

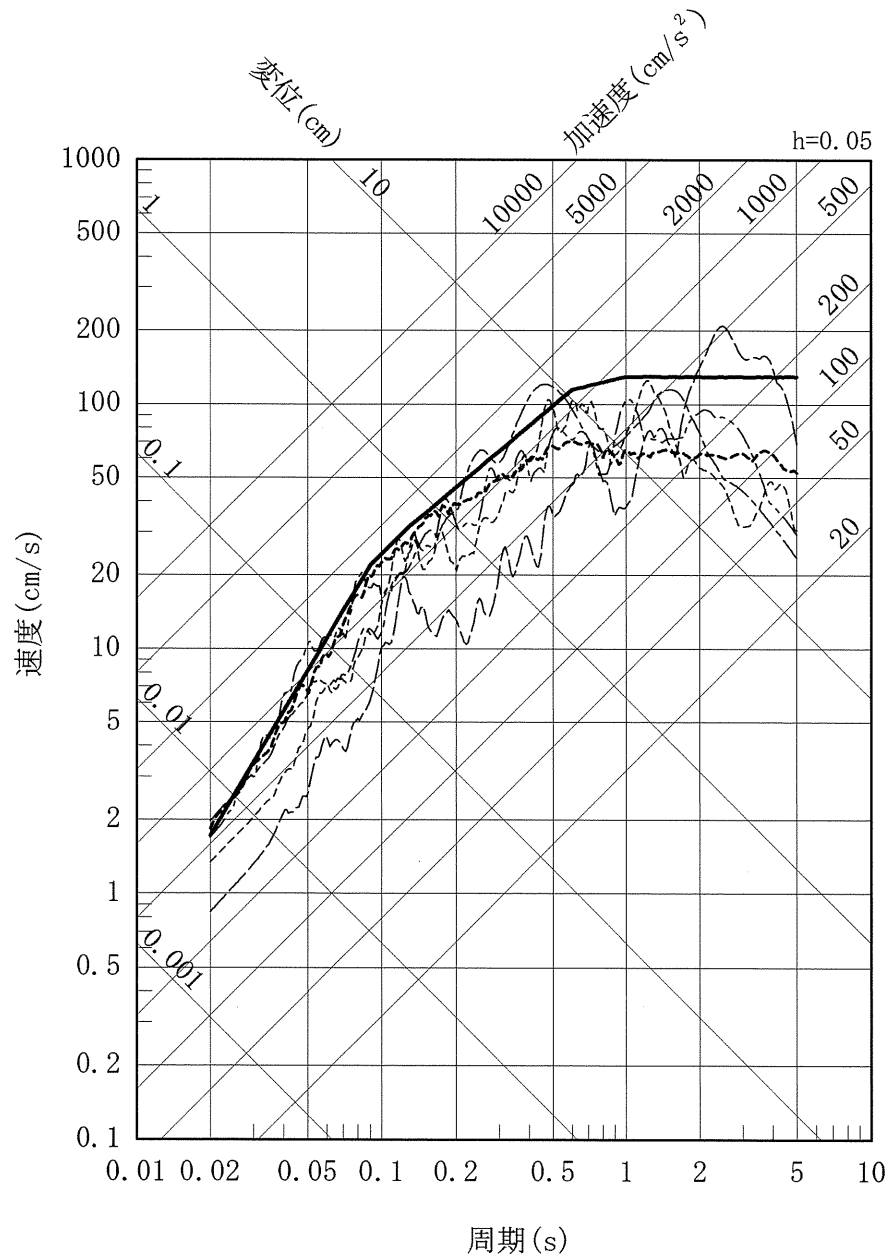


第4-8図 標準応答スペクトルを考慮した地震動の時刻歴波形

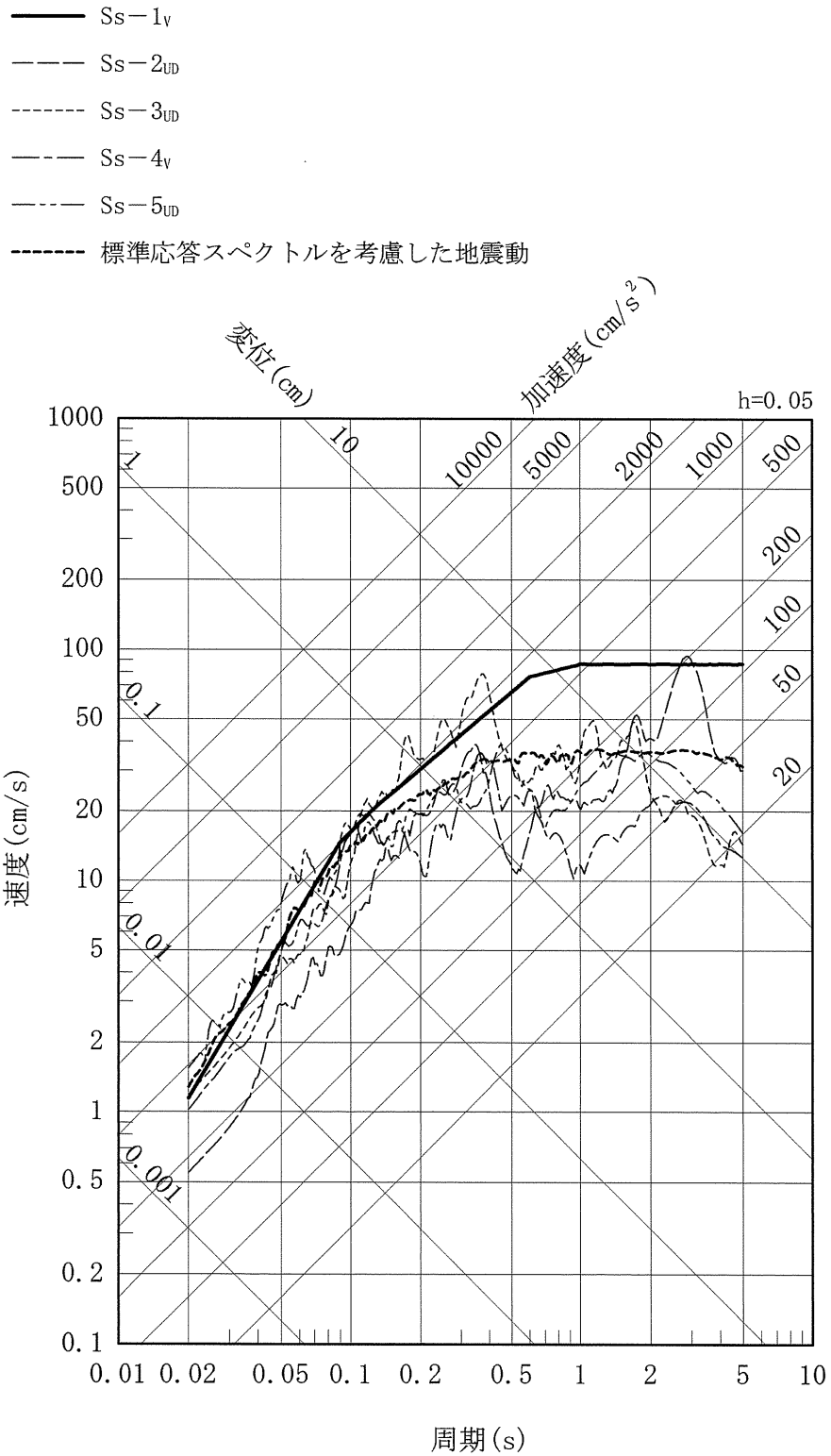


第5-1図 標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトル及び
 現行の基準地震動の応答スペクトル (水平方向 : NS)

- Ss-1_H
- - - Ss-2_{EW}
- · - · Ss-3_{EW}
- - - Ss-4_H
- · - · Ss-5_{EW}
- · - · 標準応答スペクトルを考慮した地震動



第5-2図 標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトル及び
 現行の基準地震動の応答スペクトル (水平方向 : EW)



第5-3図 標準応答スペクトルを考慮した地震動の応答スペクトル及び
 現行の基準地震動の応答スペクトル (鉛直方向)