

川内原子力発電所1号炉及び2号炉

標準応答スペクトルを考慮した地震動評価における
地下構造モデルの設定について
(コメント回答)

2022年1月21日
九州電力株式会社

余 白

1. 第983回審査会合（令和3年6月11日）におけるコメント
2. 地下構造モデルの設定
3. 地震基盤相当面の設定
4. 既許可の基準地震動への影響評価

【参考1】友澤ほか(2019a)の概要

【参考2】仮想的な地震基盤相当面の設定及び検討

【参考3】既許可時審査における鉛直アレイ観測記録の検討

1. 第983回審査会合(令和3年6月11日)におけるコメント

No.	コメント	指摘場所	対応状況
1	地下構造モデルの地盤減衰の設定について、既許可からの変更点の妥当性を説明すること。その際、EL.-28.5m～EL.-480mの層を分割していること、また、地盤減衰の設定根拠としている地震観測記録が得られていない範囲(EL.-118.5m～EL.-200m)の地盤減衰の設定の妥当性についても併せて説明すること。	第983回 原子力発電所の 新規制基準適合性に 係る審査会合 (令和3年6月11日)	P4～60
2	地下構造モデルの変更に伴う既許可の基準地震動への影響について説明すること。		P63～73
3	地震基盤相当面について、設置許可基準規則解釈別記2の $V_s=2,200\text{m/s}$ 以上に対し、 $V_s=2,150\text{m/s}$ の層上面(EL.-480m)に設定したことの妥当性を説明すること。		P61～62 【参考2】
4	模擬地震波の作成について、複数の方法から一様乱数の位相をもつ正弦波の重ね合わせを採用した妥当性を説明すること。		次回以降 説明予定
5	既許可以降の観測・調査・分析などについて説明すること。		適宜反映
6	変はんれい岩について、地質層序と地質図の凡例の記載の考え方を説明すること。		次回以降 説明予定

2. 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評価のための地下構造モデルの設定方針（1/2）

- 標準応答スペクトルは地震基盤相当面で定義されており、解放基盤表面における応答スペクトルの設定にあたっては、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の反映が必要。

- 地震波の伝播特性を反映するためには、地震基盤相当面から解放基盤表面までの地下構造モデルが必要。

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価のために、既許可（平成26年9月10日許可）の地下構造モデルを精緻化。
 - ・ 既許可の地下構造モデルは、長周期帯の地震動評価への適用を目的に設定。
 - ・ 標準応答スペクトルは周期0.02秒から5秒までの応答スペクトルで定義されていることから、今回の地下構造モデルは、短周期帯も含む地震動評価への適用を目的に設定。

2. 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評価のための地下構造モデルの設定方針（2/2）

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価のための地下構造モデルは、以下の方針に基づき設定。
 - ・ 短周期帯では、長周期帯に比べ、地盤減衰（Q値）が地震動評価結果に与える影響が顕著であるため、地盤減衰（Q値）を精緻化。
 - ・ 原子炉設置位置付近のPS検層結果が得られている範囲について、敷地地盤における鉛直アレイ観測記録に基づき、地盤減衰（Q値）を設定。
- 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を実施。
 - ・ 既許可以降、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を取得。

2. 地下構造モデルの設定

- 既許可では、「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。

地下構造モデル再設定のまとめ

- 見直し後の地下構造モデルは、微動アレイにより求められた観測位相速度と整合しており、平均的な地下構造特性を踏まえている。

長周期帯の理論的方法に用いる一次元地下構造モデル（見直し後）

EL. (m)	層	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Q 値	備考
解放基盤表面 -18.5m	1	0.0	2.70	1.50	3.20	100	試掘坑内 弾性波試験
-28.5m	2	-0.01	2.70	1.60	3.70	100	鉛直アレイ及び微動アレイの速度構造を基に設定
-480m	3	-0.462	2.70	2.15	4.40	200	微動アレイの速度構造を基に設定
-1018.5m	4	-1.0	2.70	3.01	5.20	200	宮腰ほか(2004) ⁸⁾
-2018.5m	5	-2.0	2.70	3.24	5.60	300	
-3018.5m	6	-3.0	2.70	3.50	5.90	300	地震調査委員会 (2003) ⁹⁾
-17018.5m	7	-17.0	3.00	3.80	6.60	500	
-33018.5m	8	-33.0	3.30	4.30	7.60	500	

第114回
審査会合資料

※Q値は慣用値(Vs/15~10)を基に設定

2. 地下構造モデルの設定

地盤減衰（Q値）の検討方針

- PS検層結果が得られている解放基盤表面からEL. -200mまでの範囲の地盤減衰（Q値）を精緻化。
 - ・ 原子炉設置位置付近のPS検層結果を踏まえた速度層断面では、精緻化範囲は概ね⑤速度層に分類されることを確認。
 - ・ 精緻化範囲は概ね同じ速度層に分類されるため、同一の地盤減衰（Q値）を設定。
 - ・ 精緻化範囲に設置された鉛直アレイ地震計による観測記録に基づき、地盤減衰（Q値）の精緻化を検討。
- 既許可の地下構造モデルにおいて、EL. -28.5m～EL. -480mは単一の層ではあるが、EL. -200m以深ではPS検層結果が得られておらず、直接物性を確認できないことから、EL. -200mを境界として、分割。
- EL. -200m～EL. -480mの地盤減衰（Q値）は、現行通りとする。

2. 地下構造モデルの設定

既許可の地下構造モデルにおける精緻化範囲

EL.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
解放基盤表面 -18.5m	0.0	2.70	1500	3200	100
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	100
-200m	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500

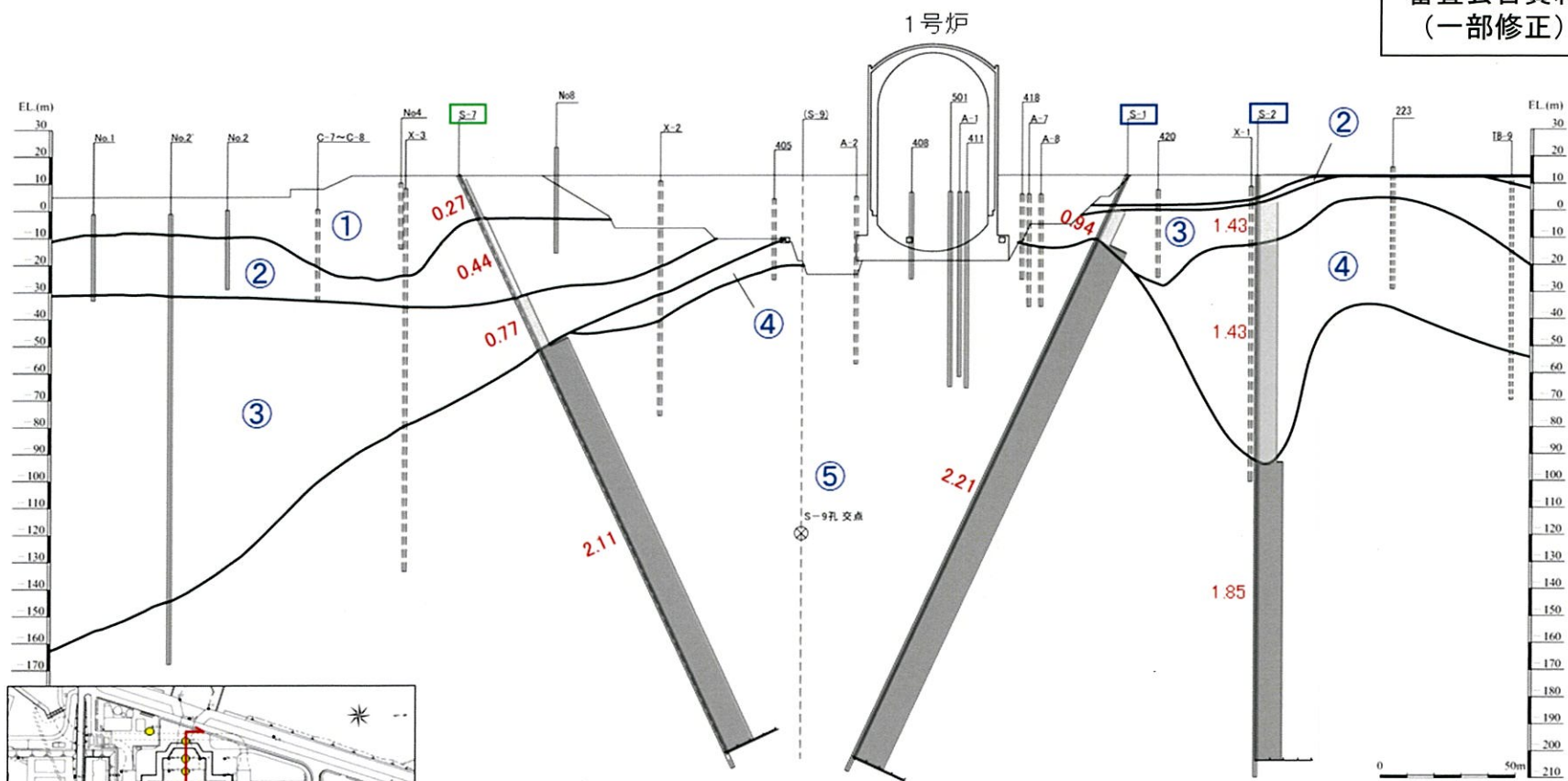
← 精緻化

分割

2. 地下構造モデルの設定

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X₁-X₁' 断面)

第5回
審査会合資料
(一部修正)



速度層区分	S波速度Vs (km/s)
①	0.28
②	0.52
③	0.90
④	1.37
⑤	2.05

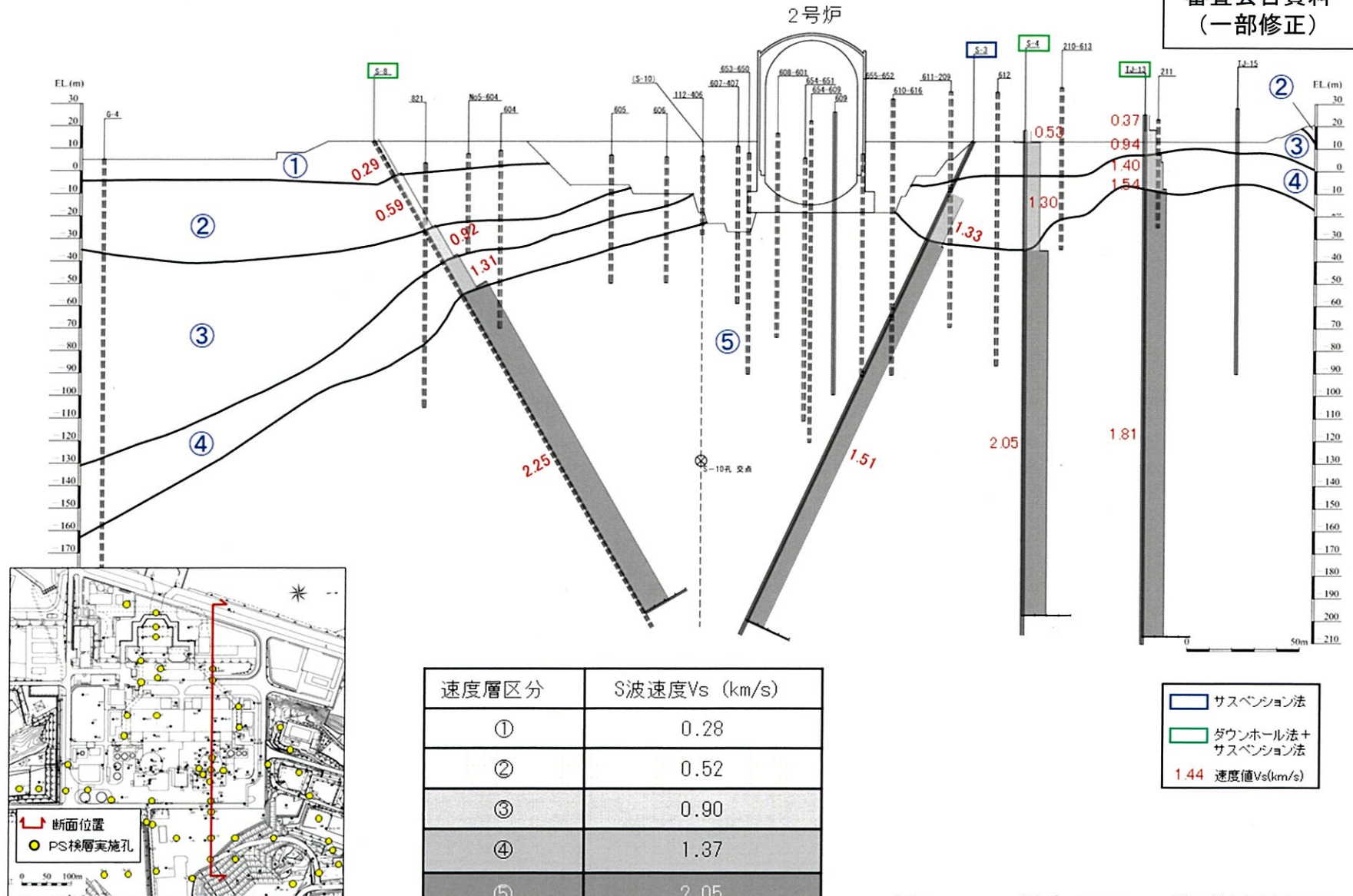
 サスペンション法
 ダウンホール法 + サスペンション法
1.44 速度値Vs(km/s)

※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

2. 地下構造モデルの設定

原子炉設置位置付近の速度層断面図 (X₂-X₂' 断面)

第5回
審査会合資料
(一部修正)

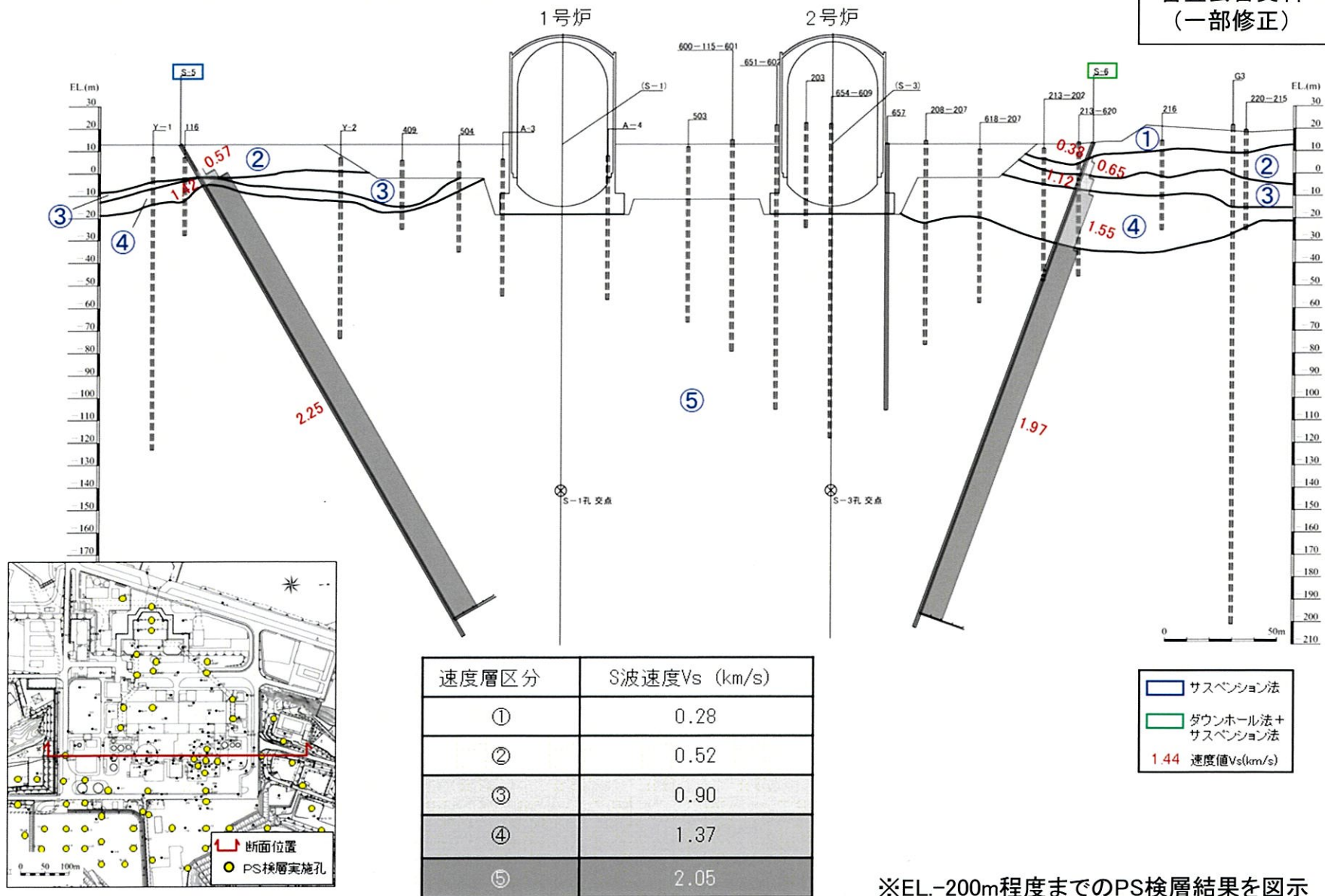


※EL.-200m程度までのPS検層結果を図示

2. 地下構造モデルの設定

原子炉設置位置付近の速度層断面図（Y-Y' 断面）

第5回
審査会合資料
(一部修正)



2. 地下構造モデルの設定

地盤減衰（Q値）の設定

- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価のための地下構造モデルについては、敷地地盤における鉛直アレイ観測記録を用いて、解放基盤表面からEL. -200mまでの地盤減衰（Q値）の検討を実施し、設定。
- 上記検討から設定した地盤減衰（Q値）の確認を実施。

(1) 敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び設定

- A. 伝達関数による検討
- B. 地震波干渉法による検討
- C. 地盤減衰（Q値）の設定

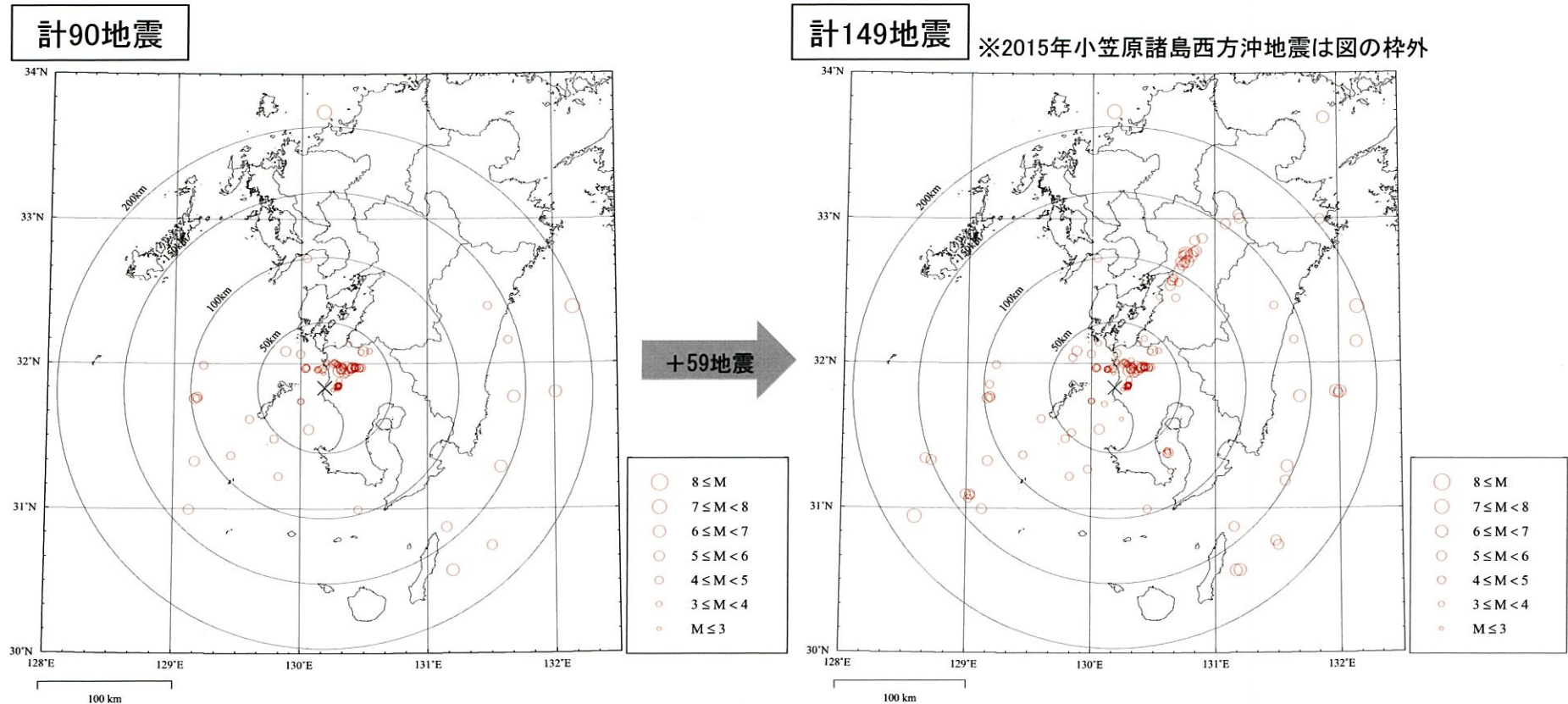
(2) 地盤減衰（Q値）の確認

- A. 伝達関数による確認
- B. 応答スペクトルによる確認
- C. 地震観測記録に基づく地盤増幅率による確認

2. 地下構造モデルの設定

敷地地盤の鉛直アレイ観測記録

- 既許可時審査以降、川内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59地震の観測記録を取得。（計149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。



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)

敷地地盤における観測地震の震央分布
(観測開始～2019年度)

2. 地下構造モデルの設定

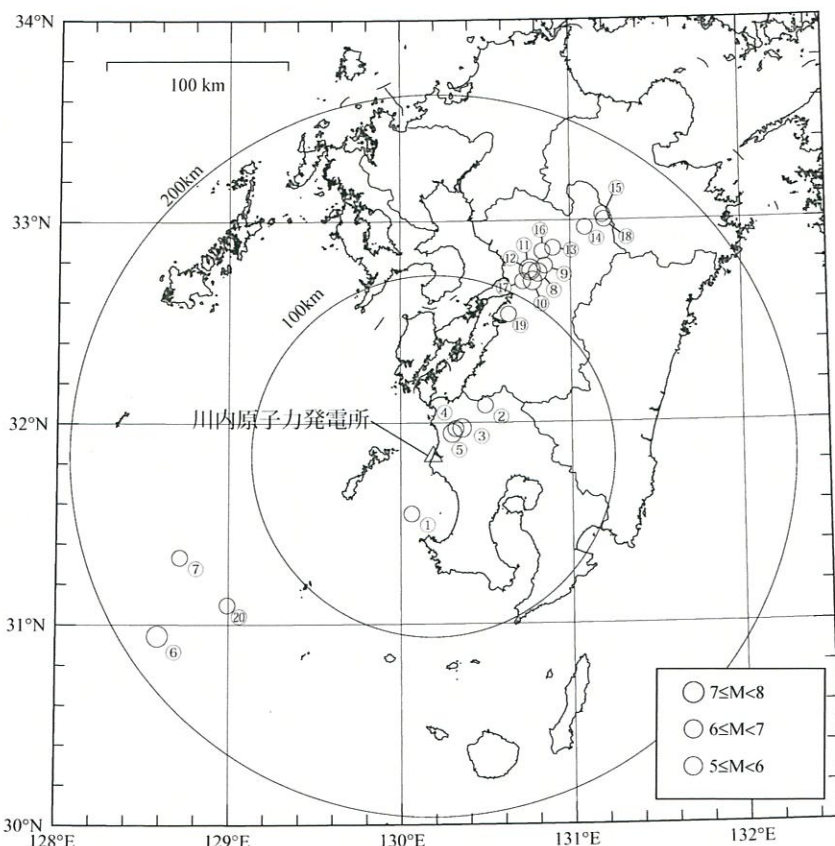
(1) 敷地地盤の鉛直アレイ観測記録による検討及び設定

A. 伝達関数による検討

○ 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20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諸元
(計20地震)



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20地震)

既許可時審査
↑
↓
今回新たに追加

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34	24
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40	25
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22	23
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20	21
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17	23
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181	25
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151	25
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116	25
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122	25
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111	25
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116	25
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115	25
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132	25
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151	25
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162	25
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	128	25
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88	25
⑳	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140	25

2. 地下構造モデルの設定

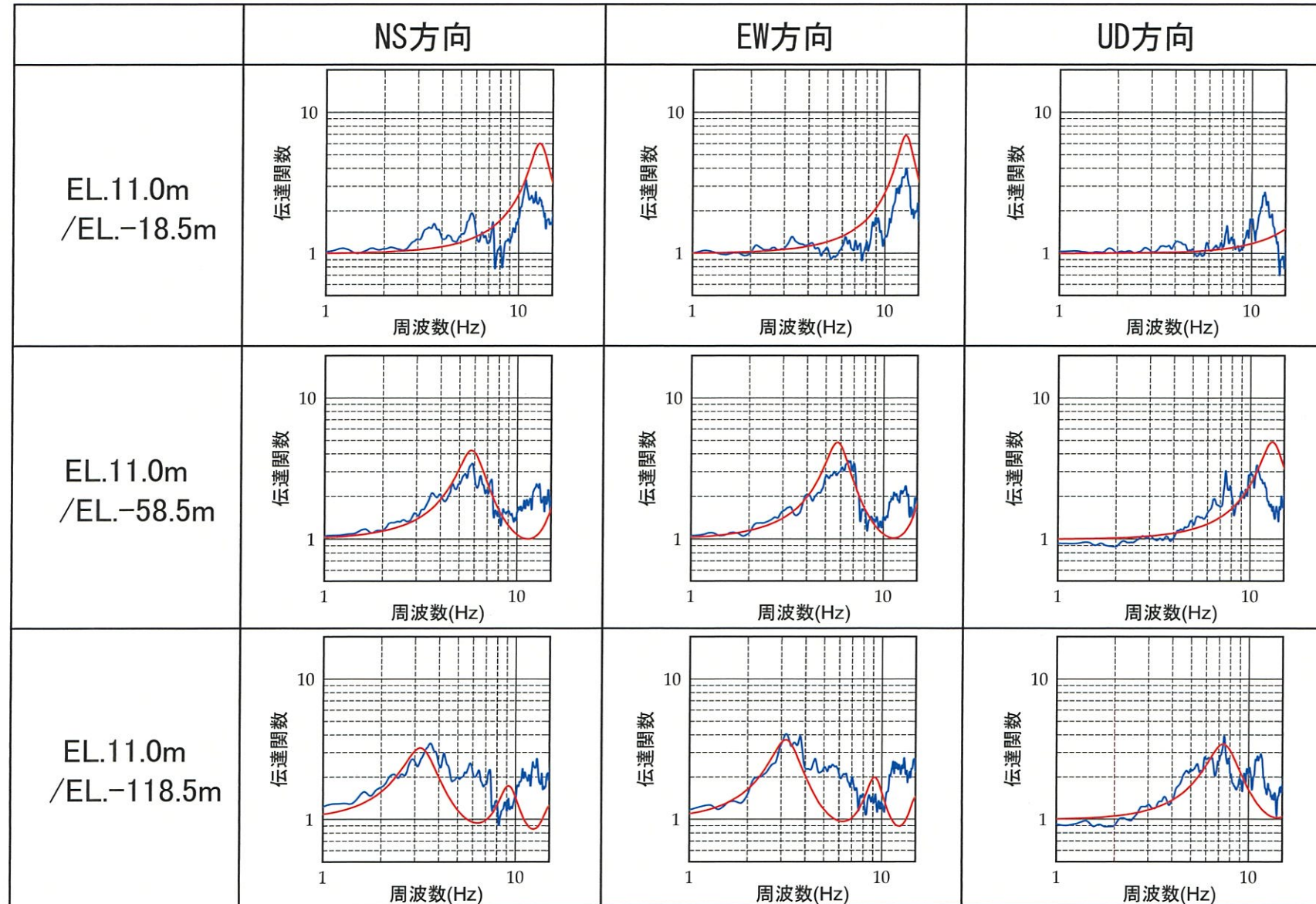
伝達関数による地盤減衰の同定における解析条件

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	20地震
ターゲットとする観測伝達関数	20地震の平均伝達関数(NS, EW, UD成分) ・EL.11.0m/EL.-18.5m ・EL.11.0m/EL.-58.5m ・EL.11.0m/EL.-118.5m 観測記録全区間を使用 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	$Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha$

2. 地下構造モデルの設定

地盤減衰の同定結果

— 地震観測記録(20地震)
— 同定結果($Q=Q_0 \cdot f^\alpha$)



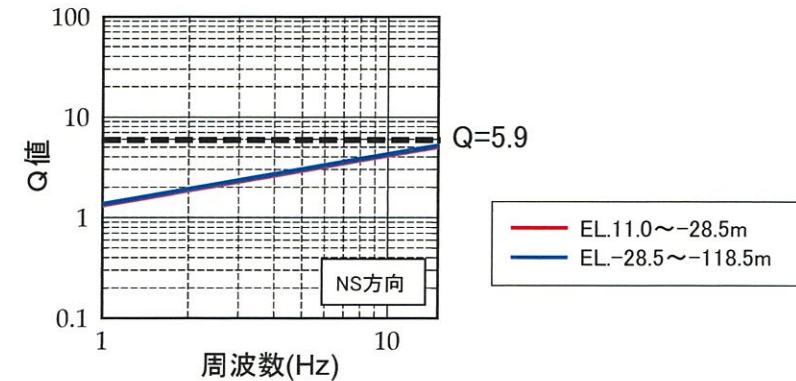
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

2. 地下構造モデルの設定

○ 伝達関数により同定された地盤減衰（Q値）の下限はQ=5.9程度。

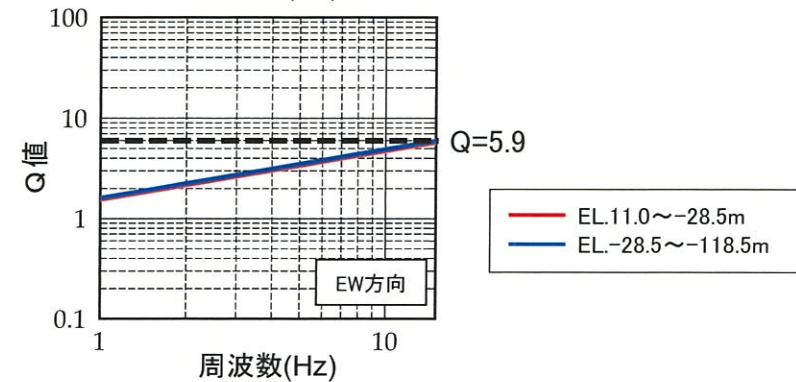
【NS方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q_0	α
11.0	2.70	1500	1.33	0.49
-28.5	2.70	1600	1.37	0.49



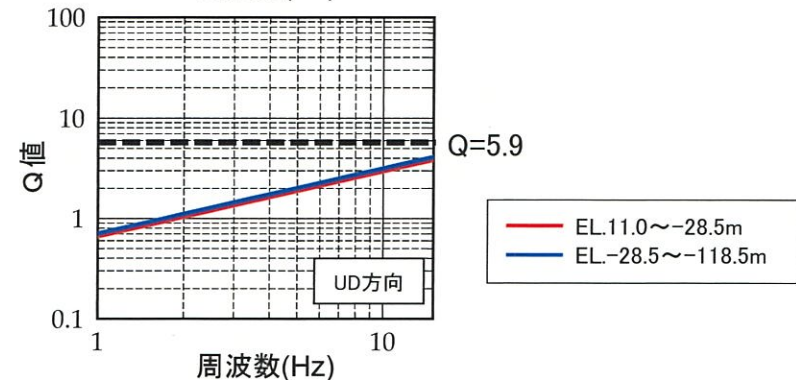
【EW方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q_0	α
11.0	2.70	1500	1.55	0.48
-28.5	2.70	1600	1.59	0.48



【UD方向】

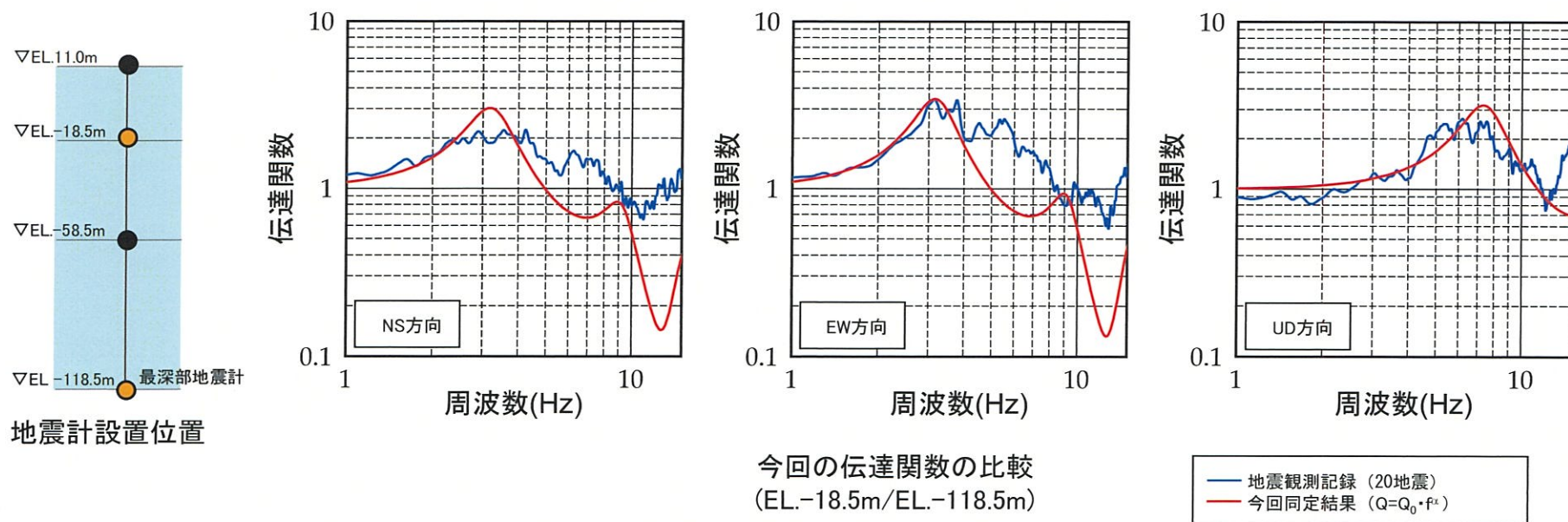
層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	減衰	
			Q_0	α
11.0	2.70	3200	0.66	0.65
-28.5	2.70	3700	0.70	0.65



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

2. 地下構造モデルの設定

- 前頁までの地盤減衰の同定結果（以下、「今回同定結果」とする。）による理論伝達関数と地震観測記録による平均伝達関数を比較した結果、1次卓越周波数におけるピークは整合。
- 水平方向の4Hz以上については、地震観測記録の平均伝達関数と部分的に整合していない。
 - 要因として考えられる以下の影響について、次頁以降で検討を実施。
 - a. 地震観測記録のスージングの影響
 - b. S波速度Vs、P波速度Vpの同定解析の影響
 - 伝達関数による比較に基づき、整合関係を確認。
 - なお、同定された地盤減衰（Q値）の比較を実施。

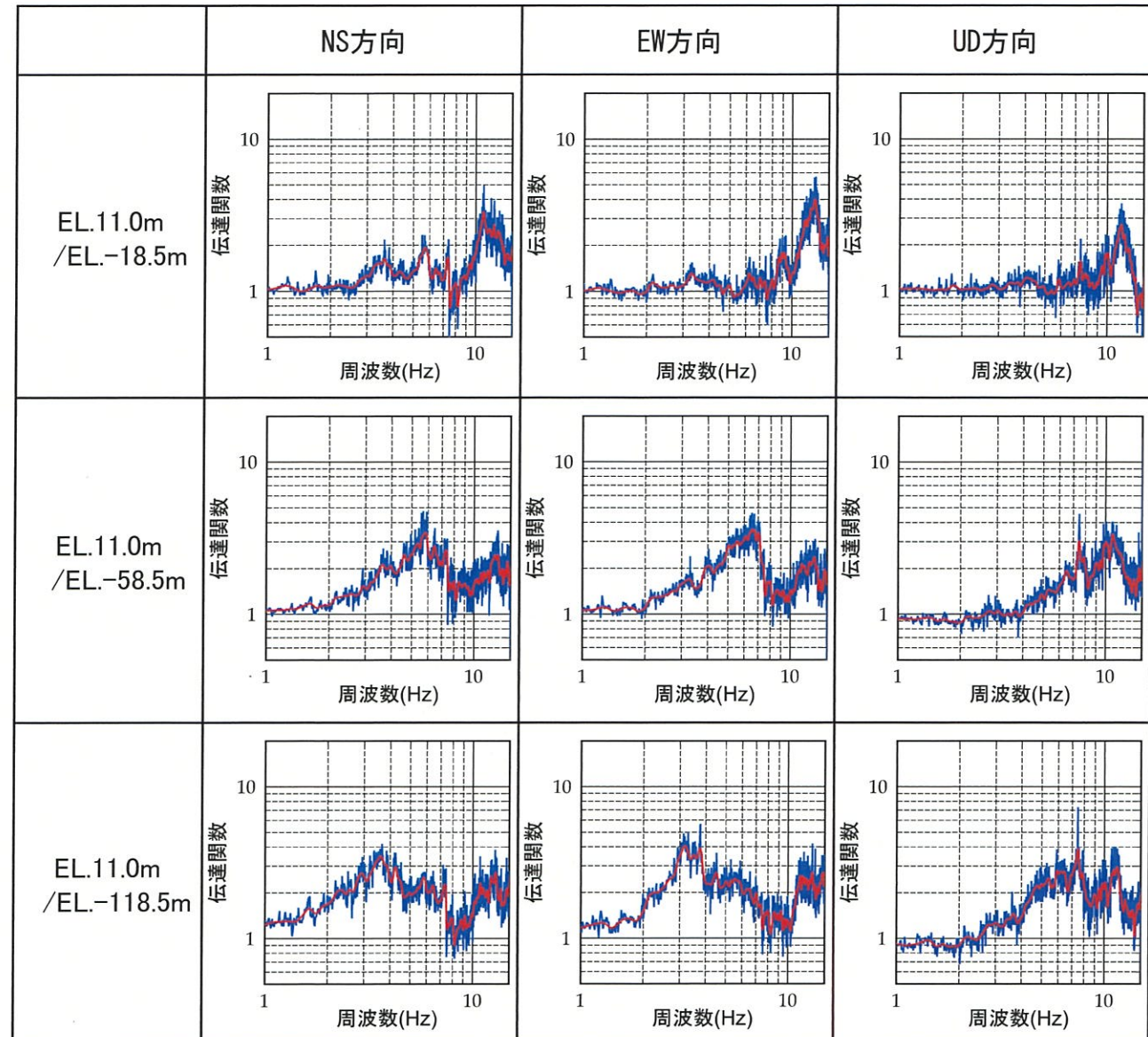
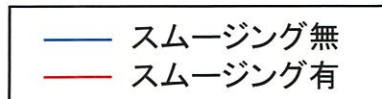


※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスージング

2. 地下構造モデルの設定

a. 地震観測記録のスージングの影響

- 今回の地盤減衰の同定では、ターゲットとする観測伝達関数について、地震観測記録（20地震）の平均伝達関数のピークを明瞭にするため、観測記録にBand幅0.2HzのParzenウィンドウ処理によりスージングを実施。
- スージングの有無により、地震観測記録（20地震）の平均伝達関数に大局的な差異は生じない。
- スージング無の場合の平均伝達関数を用いて地盤減衰の同定を実施し、今回の同定結果との比較を実施。



2. 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（スムージングの影響確認）

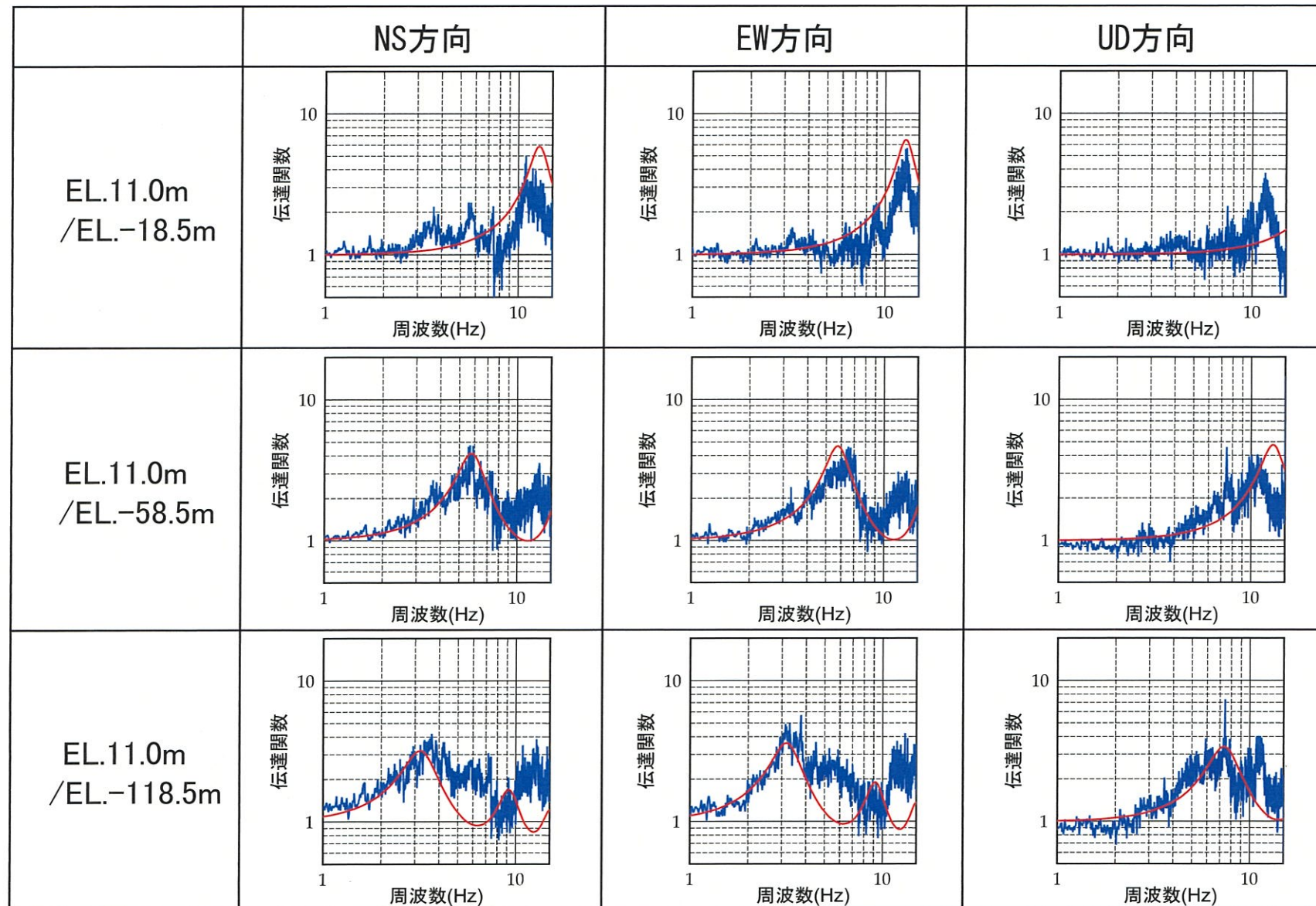
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	20地震
ターゲットとする観測伝達関数	20地震の平均伝達関数(NS, EW, UD成分) <ul style="list-style-type: none"> ・EL.11.0m/EL.-18.5m ・EL.11.0m/EL.-58.5m ・EL.11.0m/EL.-118.5m 観測記録全区間を使用 <u>ウィンドウ処理なし</u>
同定方法	層厚、密度、S波速度Vs及びP波速度Vpは、既許可の地下構造モデルの値を参照し、地盤減衰（Q値）を同定
Q値	$Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha$

※下線部は今回の地盤減衰の同定における解析条件からの変更点

2. 地下構造モデルの設定

地盤減衰の同定結果（スムージングの影響確認）

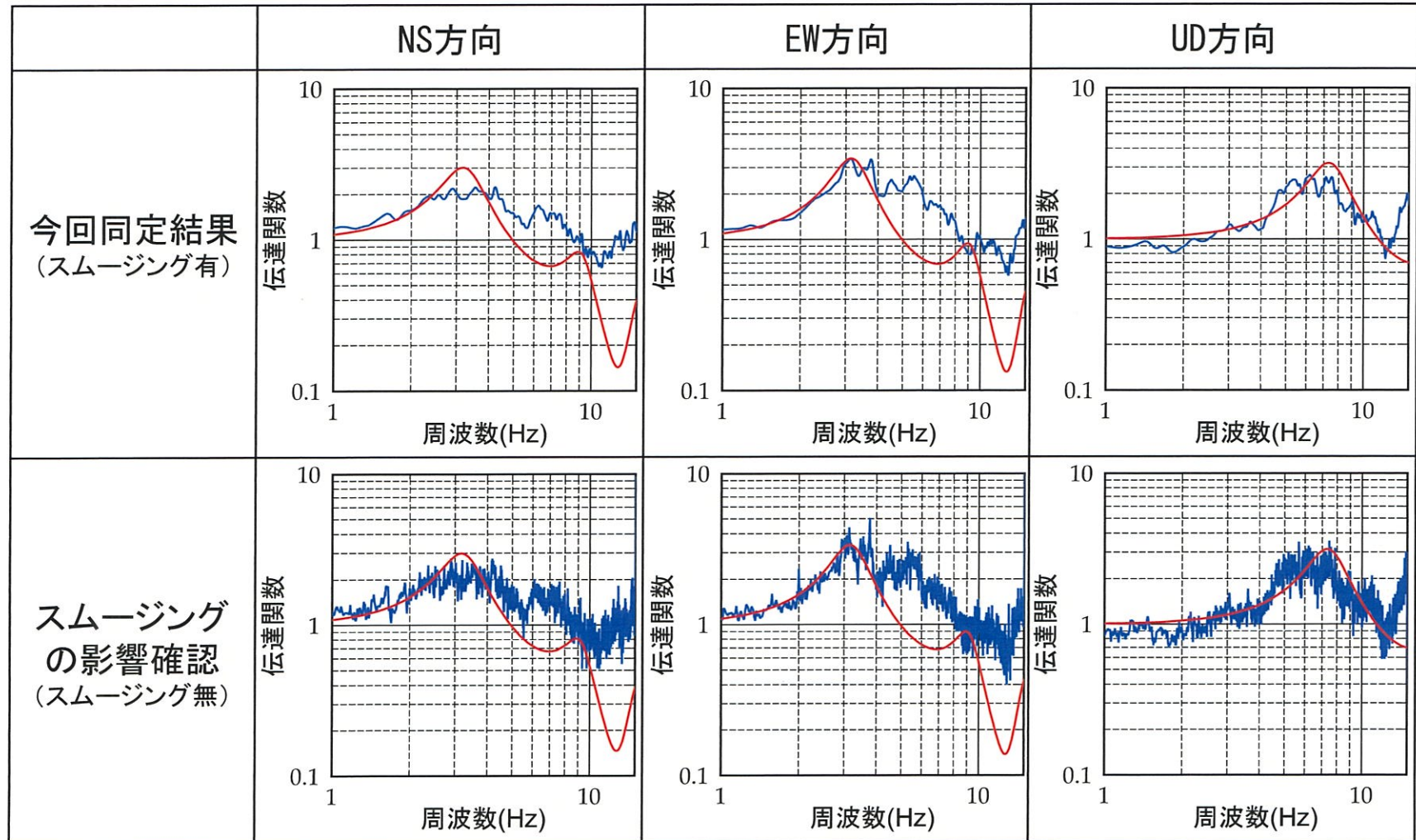
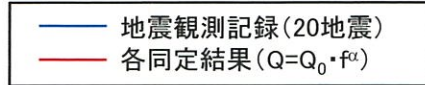
— 地震観測記録(20地震)
 — スムージングの影響確認 ($Q=Q_0 \cdot f^\alpha$)



2. 地下構造モデルの設定

地盤減衰の同定結果の比較 (EL. -18.5m/EL. -118.5m)

- スムージング無の場合の平均伝達関数を用いて地盤減衰の同定を実施した結果、今回同定結果と比べて、理論伝達関数と地震観測記録の伝達関数の整合関係に大きな差異がないことを確認。

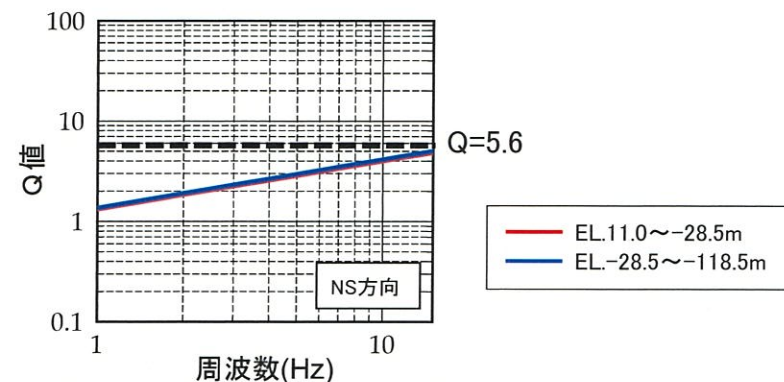


2. 地下構造モデルの設定

- スムージング無の場合の平均伝達関数を用いた同定結果（スムージングの影響確認）によると、地盤減衰（Q値）の下限は $Q=5.6$ 程度であり、今回の同定結果（ $Q=5.9$ 程度）より小さいことを確認。

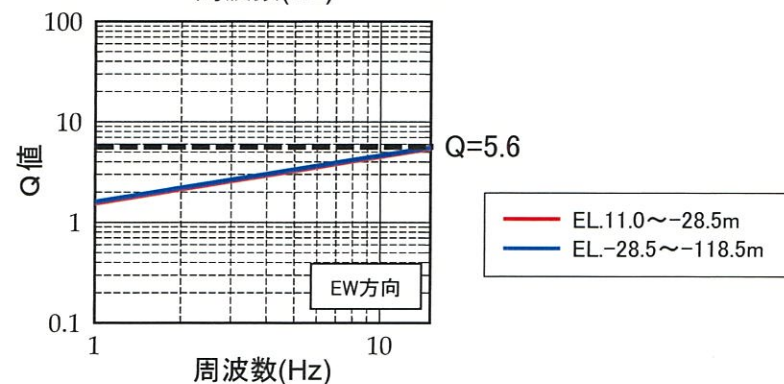
【NS方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q_0	α
11.0	2.70	1500	1.33	0.48
-28.5	2.70	1600	1.37	0.48



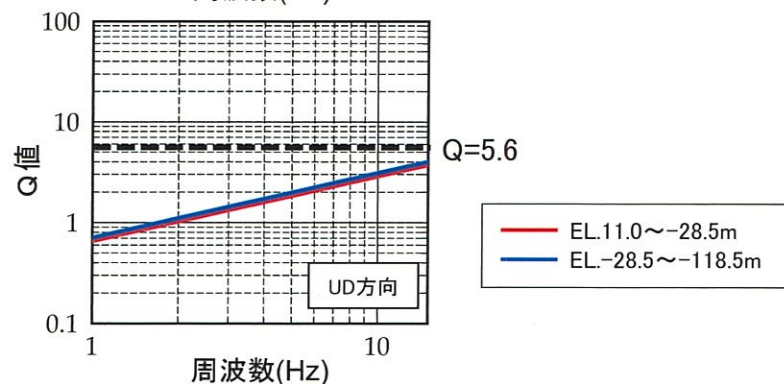
【EW方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q_0	α
11.0	2.70	1500	1.55	0.46
-28.5	2.70	1600	1.59	0.46



【UD方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	減衰	
			Q_0	α
11.0	2.70	3200	0.66	0.64
-28.5	2.70	3700	0.70	0.64



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

2. 地下構造モデルの設定

b. S波速度Vs、P波速度Vpの同定解析の影響

- 地盤減衰（Q値）に加えて、S波速度Vs、P波速度Vpを対象とした地盤同定を実施し、今回の同定結果との比較を実施。

伝達関数による地盤同定における解析条件（Vs、Vpの同定解析の影響確認）

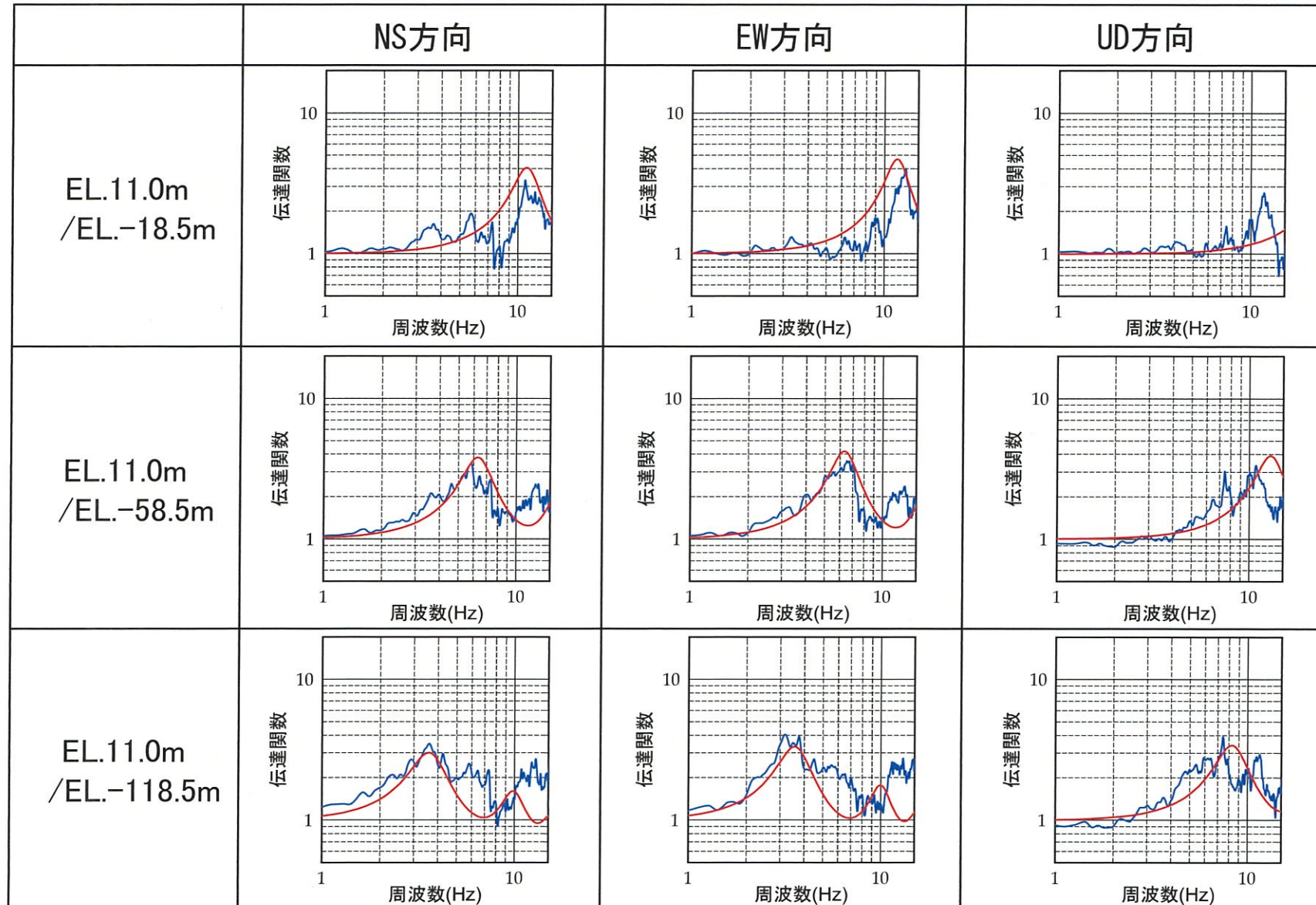
項目	条件
対象地震の選定条件	M5.4以上、震央距離200km程度以内の内陸地殻内地震
対象地震数	20地震
ターゲットとする観測伝達関数	20地震の平均伝達関数(NS, EW, UD成分) <ul style="list-style-type: none"> ・EL.11.0m/EL.-18.5m ・EL.11.0m/EL.-58.5m ・EL.11.0m/EL.-118.5m 観測記録全区間を使用 Band幅0.2HzのParzenウィンドウ
同定方法	<u>層厚は各地震計観測点の距離、</u> <u>密度は既許可の地下構造モデルの値を参照し、</u> <u>S波速度Vs、P波速度Vp、地盤減衰（Q値）を同定</u>
Q値	$Q(f)=Q_0 \cdot f^\alpha$

※下線部は今回の地盤減衰の同定における解析条件からの変更点

2. 地下構造モデルの設定

地盤同定結果 (Vs、Vpの同定解析の影響確認)

— 地震観測記録 (20地震)
 — Vs、Vpの同定解析の影響確認 ($Q=Q_0 \cdot f^\alpha$)

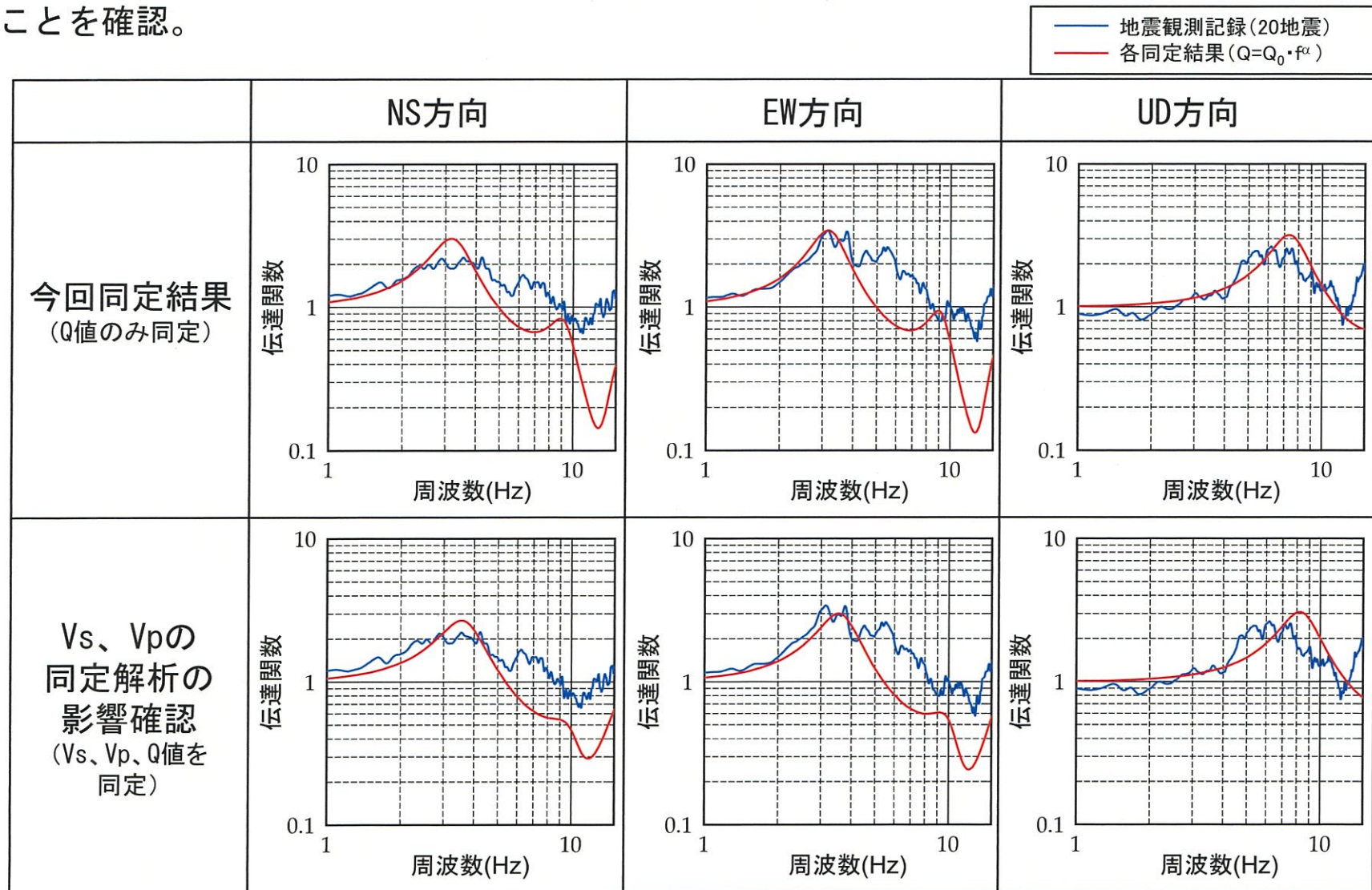


※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

2. 地下構造モデルの設定

地盤減衰の同定結果の比較 (EL. -18.5m/EL. -118.5m)

- 地盤減衰 (Q値) に加えて、S波速度Vs、P波速度Vpを対象とした地盤同定を実施した結果、今回同定結果と比べて、理論伝達関数と地震観測記録の伝達関数の整合関係に大きな差異がないことを確認。



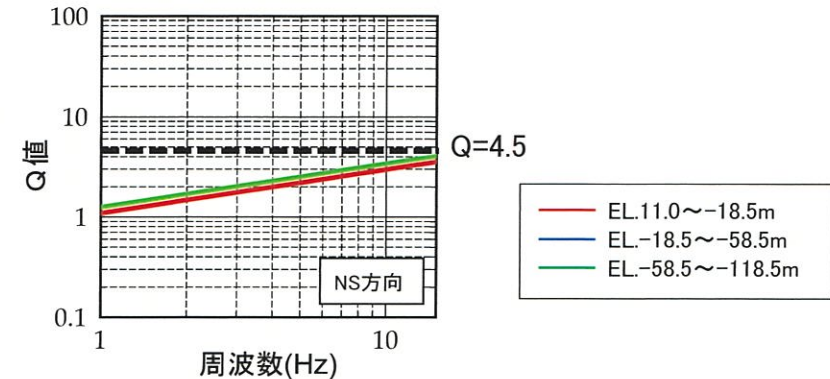
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

2. 地下構造モデルの設定

- 地盤減衰（Q値）に加えて、S波速度Vs、P波速度Vpを対象とした同定結果（Vs、Vpの同定解析の影響確認）によると、地盤減衰（Q値）の下限はQ=4.5程度であり、今回の同定結果（Q=5.9程度）より小さいことを確認。

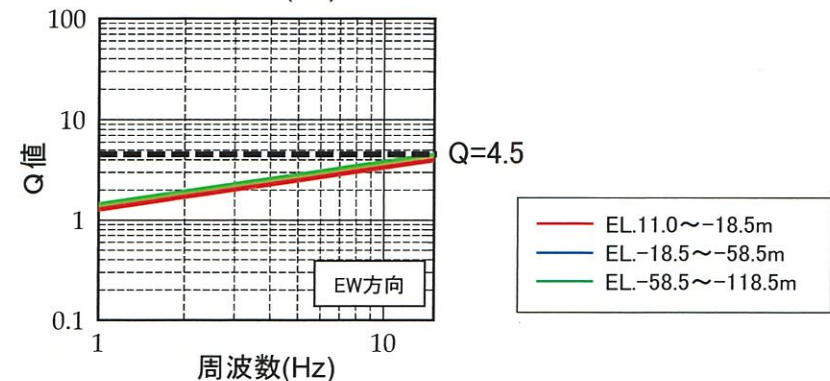
【NS方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.70	1280	1.09	0.43
-18.5	2.70	1798	1.25	0.43
-58.5	2.70	1799	1.25	0.43



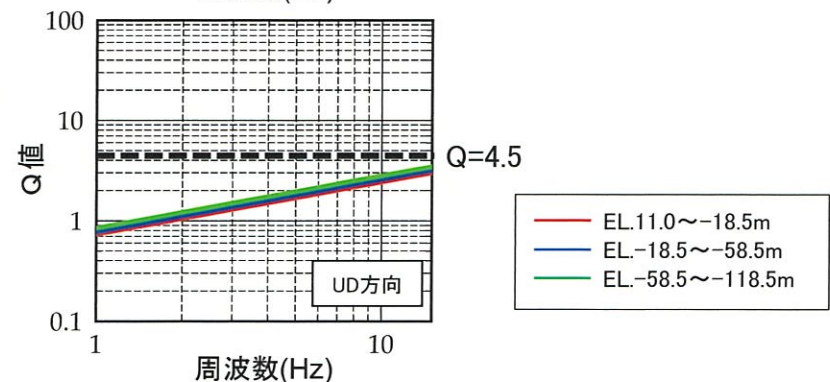
【EW方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.70	1355	1.28	0.42
-18.5	2.70	1796	1.43	0.42
-58.5	2.70	1799	1.43	0.42



【UD方向】

層上面 EL (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vp (m/s)	減衰	
			Q ₀	α
11.0	2.70	3135	0.74	0.52
-18.5	2.70	3560	0.77	0.52
-58.5	2.70	4394	0.84	0.52



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

2. 地下構造モデルの設定

(1) A. 伝達関数による検討のまとめ

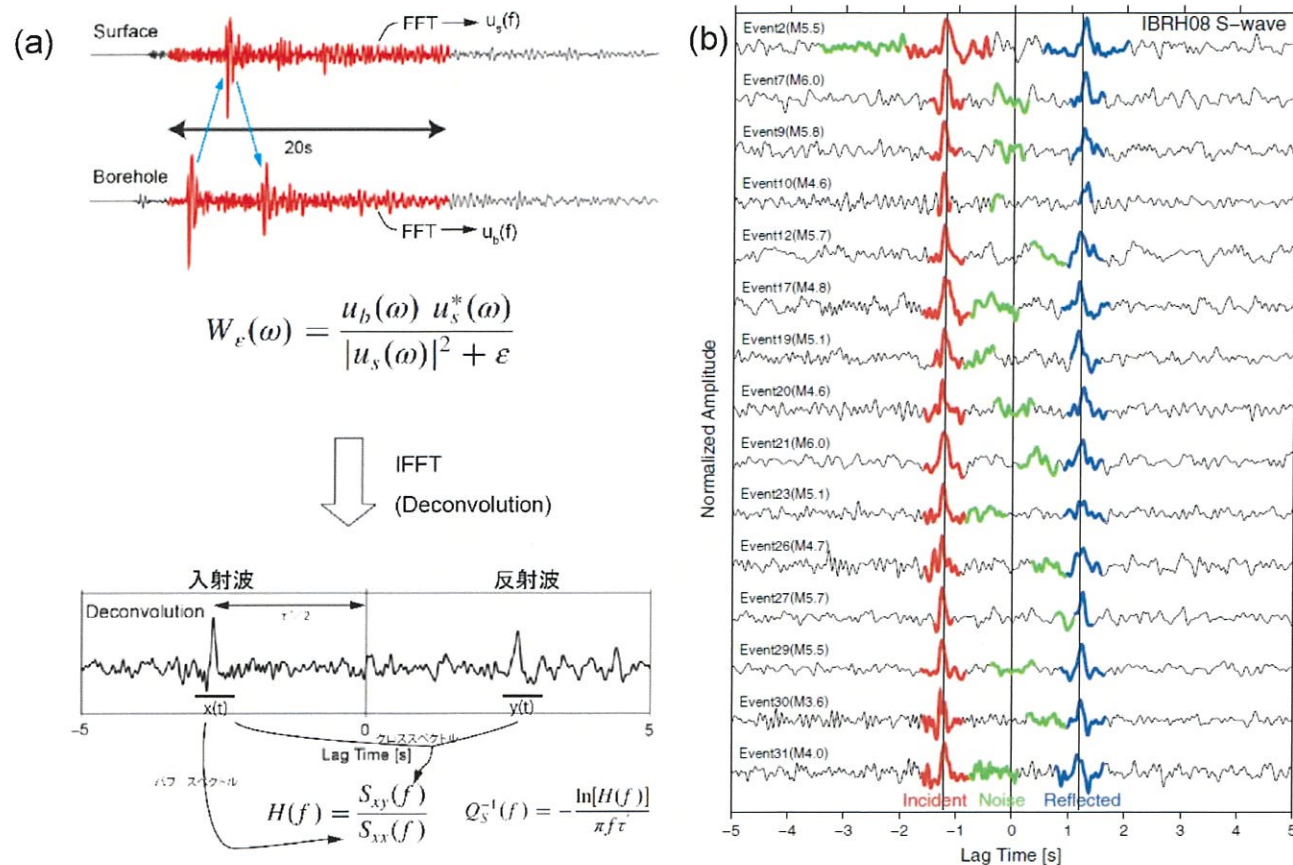
- 鉛直アレイ地震観測記録に基づく伝達関数による検討では、20地震の観測記録を対象に、地盤減衰（Q値）を同定した結果、地盤減衰（Q値）の下限は、 $Q=5.9$ 程度。
- 上記地盤減衰の同定において、水平方向の4Hz以上で同定結果による理論伝達関数と地震観測記録の伝達関数が部分的に整合していない要因について確認した結果、地震観測記録のスミージングや V_s 、 V_p の同定解析による影響ではないことを確認。

次頁以降では、地震波干渉法により、地下構造モデルを用いず、地盤減衰（Q値）を直接推定し、伝達関数による地盤減衰の同定結果との比較を実施。

2. 地下構造モデルの設定

B. 地震波干渉法による検討

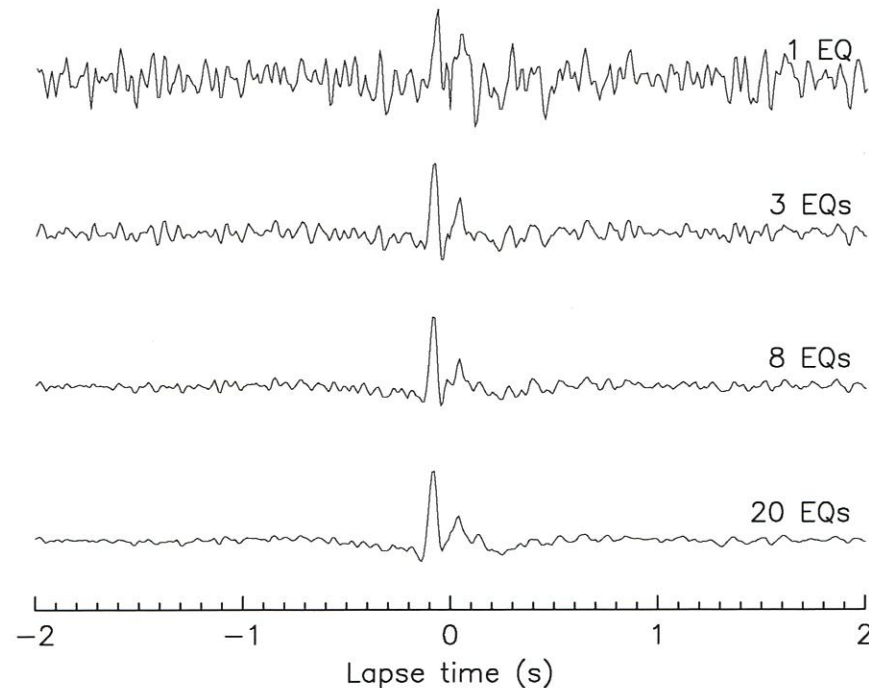
- 既許可時審査以降の最新の技術的知見として、地震波干渉法^{2),3)}により、地下構造モデルを用いず、鉛直アレイ地震観測記録から地盤減衰（Q値）を直接推定。
- 地中の地震観測記録には、鉛直下方から入射された波動が地表で反射し、反射波が記録されるため、地表の観測記録に対して地中記録をデコンボリューションすると、入射波（負側）と反射波（正側）が分離。
- 複数の地震観測記録をスタックしたデコンボリューション波形を用いて、入射波に対する反射波の振幅の比率に基づき、地盤減衰（Q値）を推定。



Fukushima et al.(2016)
(一部加筆)

2. 地下構造モデルの設定

- デコンボリューション波形を精度よく求めるためには、多くの地震観測記録のデコンボリューション波形をスタックする必要がある。
 - スタックする地震観測記録が多くなると、ノイズが除去され、シグナルが明瞭になる。
 - スタックする地震観測記録が少なく、シグナルが不明瞭なデコンボリューション波形を用いると、地盤減衰（Q値）を適切に推定できない。



地震観測記録数によるデコンボリューション波形の違い

2. 地下構造モデルの設定

- 地震波干渉法による地盤減衰（Q値）の推定は、伝達関数による検討と同様の観測点※で計20地震の観測記録を対象として実施。

※ 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

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20地震)

番号	地震名	発生日	M	震央距離 (km)	入射角 (°)
①	九州西側海域	1984年8月15日	5.5	34	24
②	鹿児島県北西部	1994年2月13日	5.7	40	25
③	鹿児島県北西部	1997年3月26日	6.6	22	23
④	鹿児島県北西部	1997年4月3日	5.7	20	21
⑤	鹿児島県北西部	1997年5月13日	6.4	17	23
⑥	薩摩半島西方沖	2015年11月14日	7.1	181	25
⑦	薩摩半島西方沖	2015年11月15日	5.9	151	25
⑧	熊本県熊本地方	2016年4月14日	6.5	116	25
⑨	熊本県熊本地方	2016年4月14日	5.8	122	25
⑩	熊本県熊本地方	2016年4月15日	6.4	111	25
⑪	熊本県熊本地方	2016年4月16日	7.3	116	25
⑫	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	115	25
⑬	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.9	132	25
⑭	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.9	151	25
⑮	熊本県阿蘇地方	2016年4月16日	5.8	162	25
⑯	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	128	25
⑰	熊本県熊本地方	2016年4月16日	5.4	108	25
⑱	熊本県阿蘇地方	2016年4月18日	5.8	161	25
⑲	熊本県熊本地方	2016年4月19日	5.5	88	25
⑳	薩摩半島西方沖	2016年5月7日	5.5	140	25

2. 地下構造モデルの設定

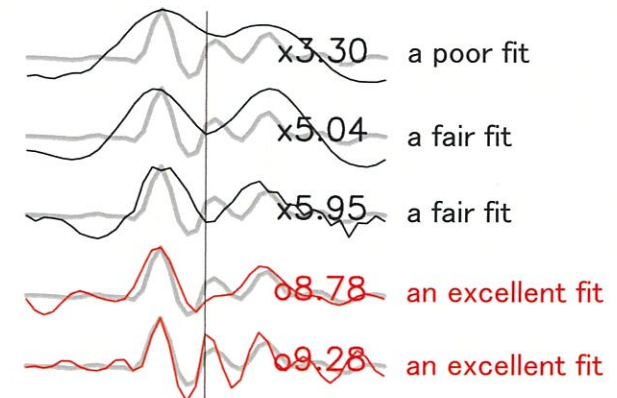
- 対象とした20地震の観測記録から、Anderson(2004)⁴⁾による指標 (GOF : Goodness Of Fit) に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形の一致度が高いものを抽出。
 - Anderson(2004)では、2つの波形の一致度などを表す適合度指標を提案。
 - これらのうち2つの波形の相関を表す指標 (GOF) として、コヒーレンスを10倍した値を採用し、その値に応じた以下の適合度が示されている。

a poor fit : ~4	a good fit : 6~8
a fair fit : 4~6	an excellent fit : 8~
- 本検討では、スタックしたデコンボリューション波形と各地震のデコンボリューション波形のGOFを求め、an excellent fit (8~) の波形を抽出。

2つの波形の相関を表す指標 (GOF)

Number	Symbol	Name: Similarity of	Definition ¹
C10	C*	Cross Correlation	$C^* = 10 \max[C(a_1(t), a_2(t)), 0]$ where $C(a_1, a_2) = \frac{\int a_1(t)a_2(t)dt}{\left[\int a_1^2(t)dt\right]^{1/2} \left[\int a_2^2(t)dt\right]^{1/2}}$

Anderson(2004)

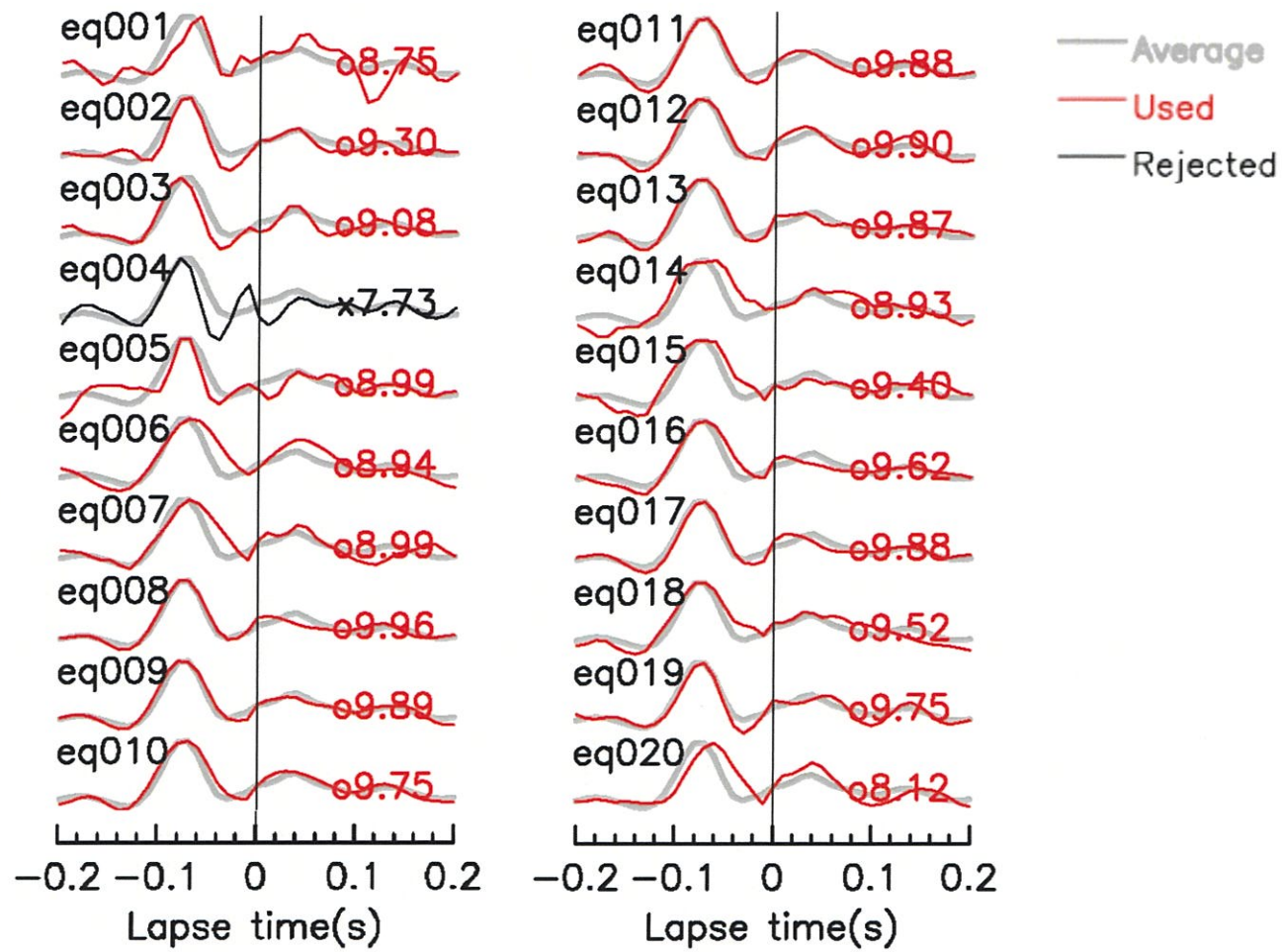


GOFの例

(赤線を抽出、黒線を除外)

2. 地下構造モデルの設定

- Anderson (2004) の指標に基づき、スタックしたデコンボリューション波形と各地震の波形の一致度が高い19地震の波形を抽出。



スタックした波形と各地震の波形の相関

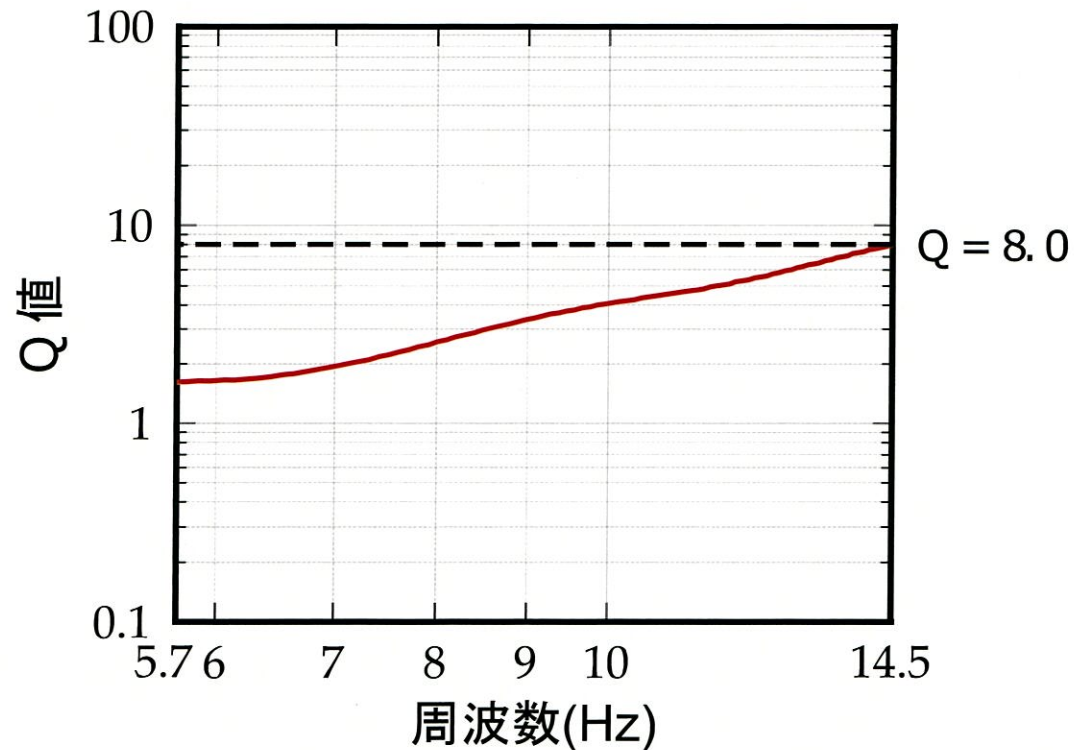
2. 地下構造モデルの設定

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	20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	スタックしたデコンボリューション波形と一致度が高い($C^* > 8$)地震
	対象地震数	19地震
	解析区間	ピーク時間 × 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 $f/1.3 \sim 1.3f$

2. 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 $Q=8.0$ 程度。
- 伝達関数により同定された地盤減衰 (Q値) と地震波干渉法により推定された地盤減衰 (Q値) は、概ね整合しており、両手法の検討結果の信頼性を確認。

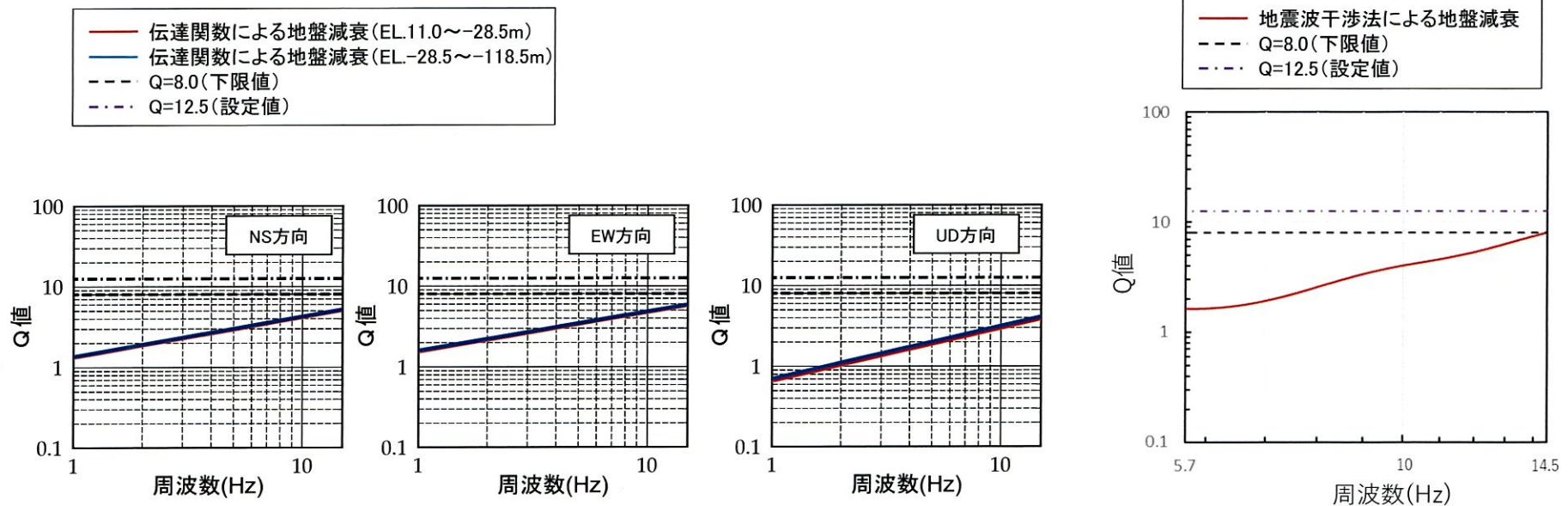


地震波干渉法により推定された地盤減衰
(EL.11.0m~EL.-118.5m)

2. 地下構造モデルの設定

C. 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検討 ((1)A.) 及び地震波干渉法による検討 ((1)B.) を踏まえ、解放基盤表面からEL. -200mまでの地盤減衰 (Q値) を設定。
- 上記検討による地盤減衰 (Q値) の下限はQ=8.0程度。
- 以上を踏まえ、地盤減衰の不確かさを考慮し、保守的に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.11.0m~EL.-118.5m)

地震波干渉法により推定された地盤減衰(EL.11.0m~EL.-118.5m)

2. 地下構造モデルの設定

- 前頁の通り、下表の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.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値
解放基盤表面	-18.5m	0.0	1500	3200	12.5
	-28.5m	-0.01	1600	3700	12.5
	-200m	-0.182	1600	3700	100
	-480m	-0.462	2150	4400	200
	-1018.5m	-1.0	3010	5200	200
	-2018.5m	-2.0	3240	5600	300
	-3018.5m	-3.0	3500	5900	300
	-17018.5m	-17.0	3800	6600	500
	-33018.5m	-33.0	4300	7600	500

2. 地下構造モデルの設定

(2) 地盤減衰 (Q値) の確認

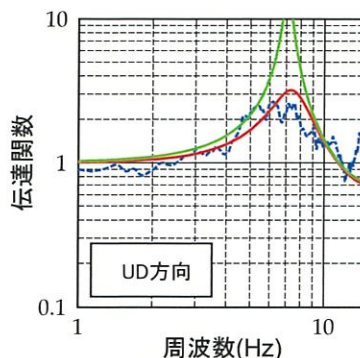
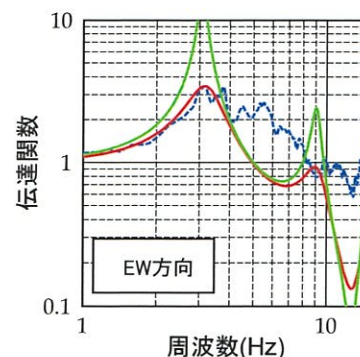
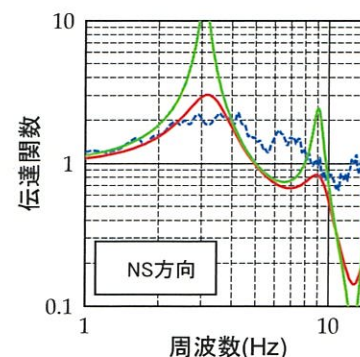
A. 伝達関数による確認

- 今回設定した地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数と今回同定した地盤減衰による理論伝達関数との比較を実施。
- その結果、今回設定した地盤減衰 (Q=12.5) による理論伝達関数のほうが卓越周波数において大きなピークを有することを確認。

地下構造モデル (Q=12.5)

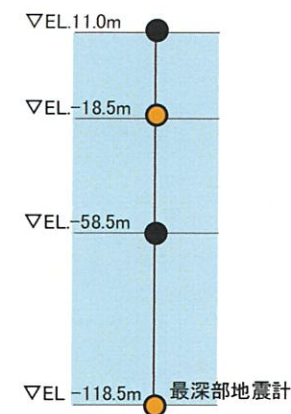
EL. (m)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q値
11.0m	2.7	1500	3200	12.5
-18.5m	2.7	1500	3200	12.5
-28.5m	2.7	1600	3700	12.5
-118.5m	2.7	1600	3700	12.5

※解放基盤表面 (EL. -18.5m) 上に層を追加



伝達関数の比較
(EL.-18.5m/EL.-118.5m)

— 設定値 (Q=12.5)
— 今回同定結果 (Q=Q₀・f^α)
... 地震観測記録 (20地震)



地震計設置位置

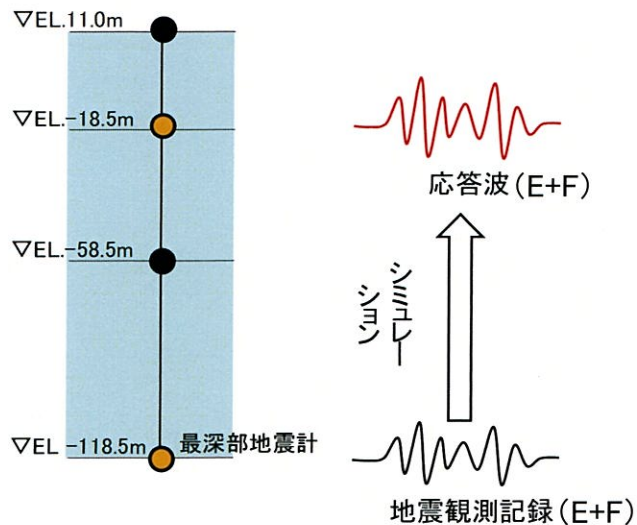
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

2. 地下構造モデルの設定

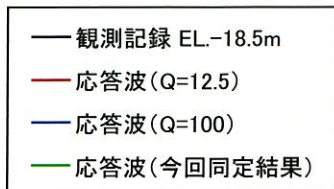
B. 応答スペクトルによる確認

- 鉛直アレイ地震観測記録の伝達関数による地盤減衰の同定結果及び設定した地盤減衰 ($Q=12.5$) を用いて、応答スペクトルによる確認を実施。
- 最深部地震計 (EL. -118.5m) で得られた地震観測記録を入力とし、1次元波動論に基づき、推定した応答波 (EL. -18.5m) の応答スペクトルと同位置の地震計で得られた地震観測記録の応答スペクトルとの比較を実施。
 - 地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルは、地盤同定結果を用いた応答波の応答スペクトルを上回ることを確認。
 - 地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルは、大半の地震において、地震観測記録の応答スペクトルと比べて、同等もしくは上回ることを確認。
 - なお、既許可の地盤減衰 ($Q=100$) による応答波の応答スペクトルは、短周期帯において、観測記録の応答スペクトルと整合せず、過度な保守性を有していることを確認。

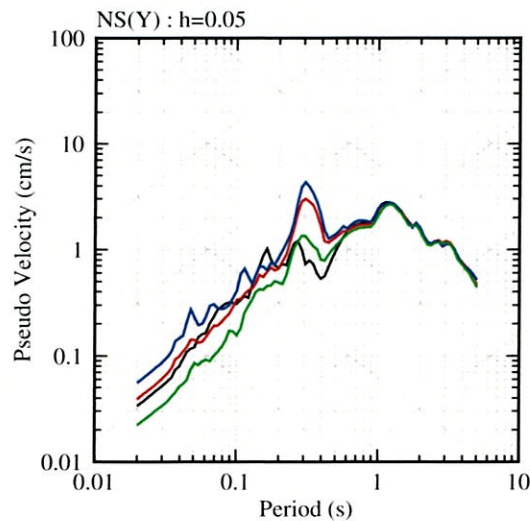
2. 地下構造モデルの設定



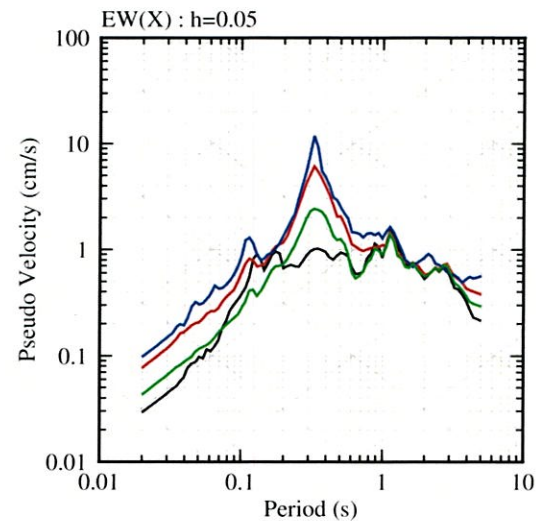
検証のイメージ



①九州西側海域

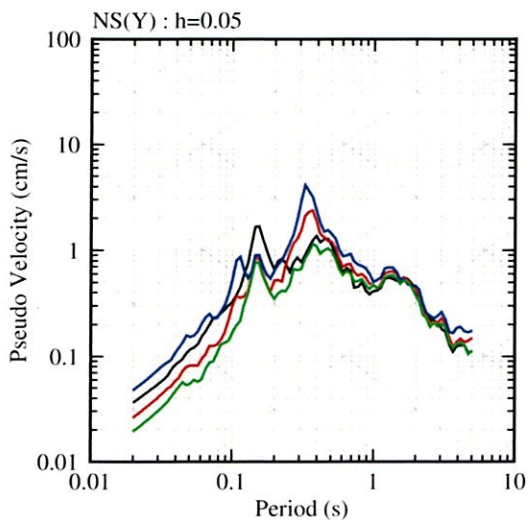


NS方向

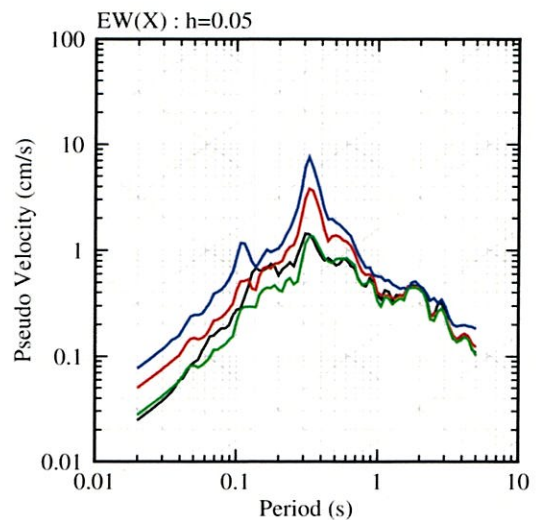


EW方向

②鹿児島県北西部

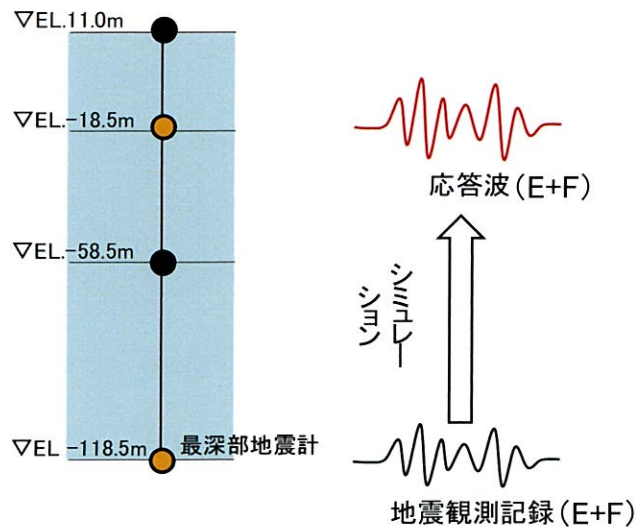


NS方向

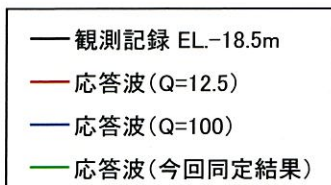


EW方向

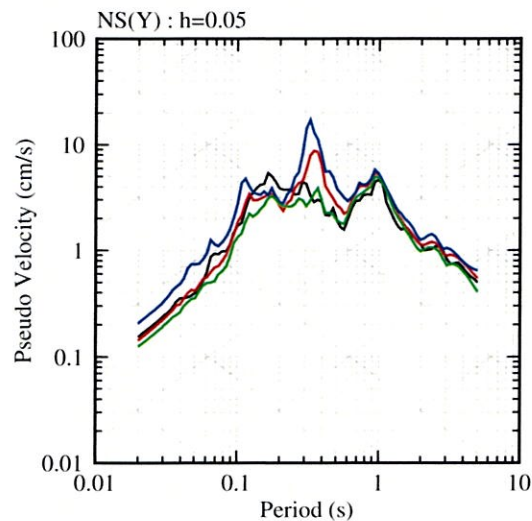
2. 地下構造モデルの設定



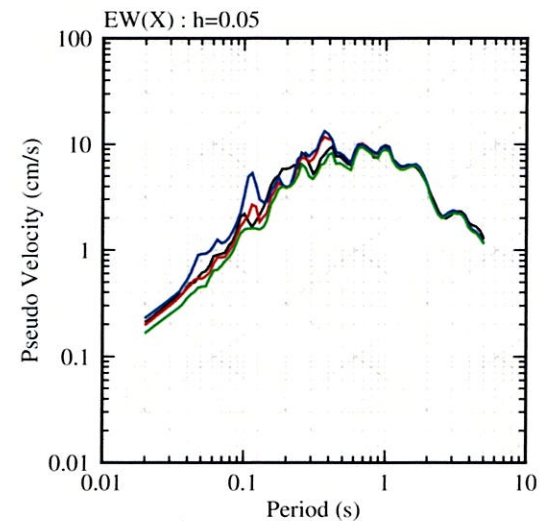
検証のイメージ



③ 鹿児島県北西部 (1997年3月本震)

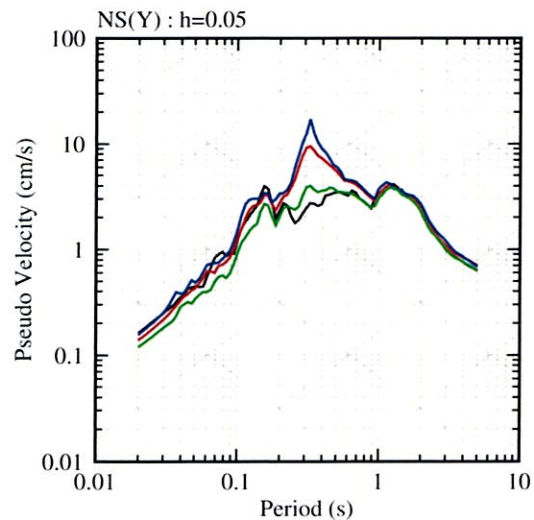


NS方向

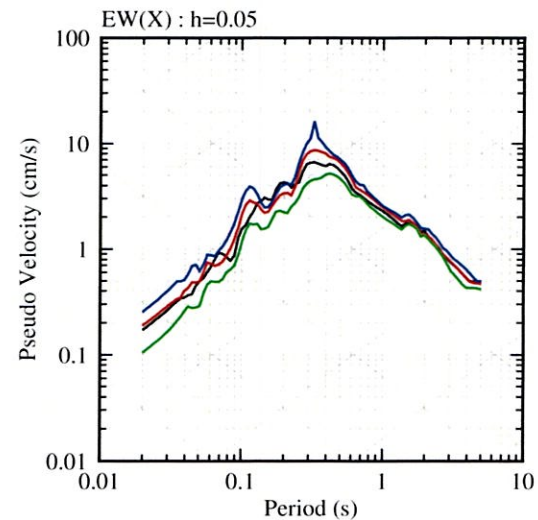


EW方向

④ 鹿児島県北西部

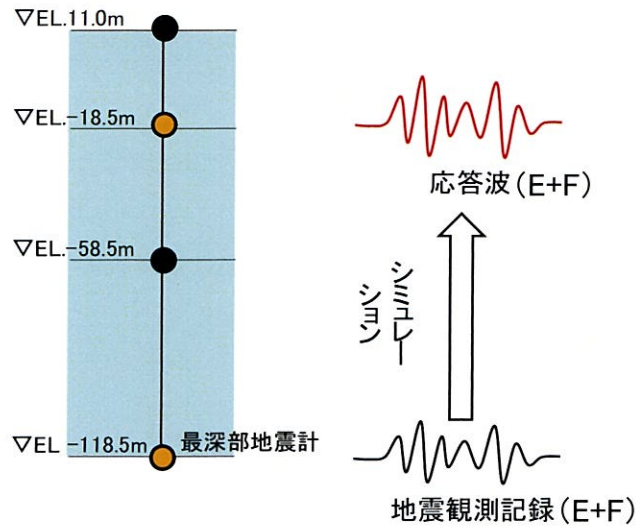


NS方向

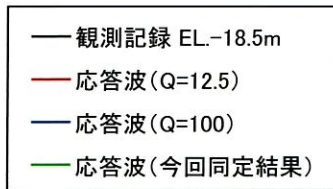


EW方向

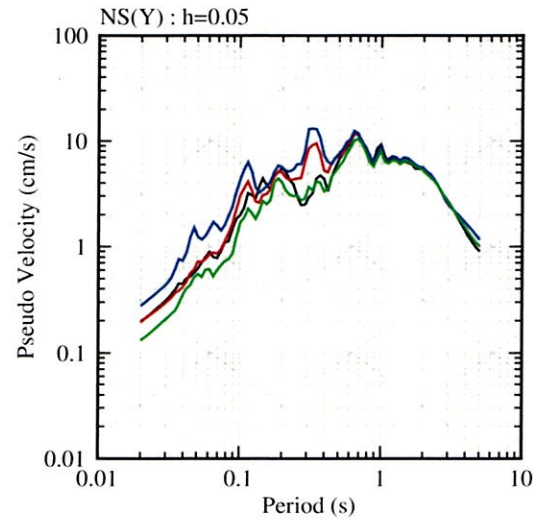
2. 地下構造モデルの設定



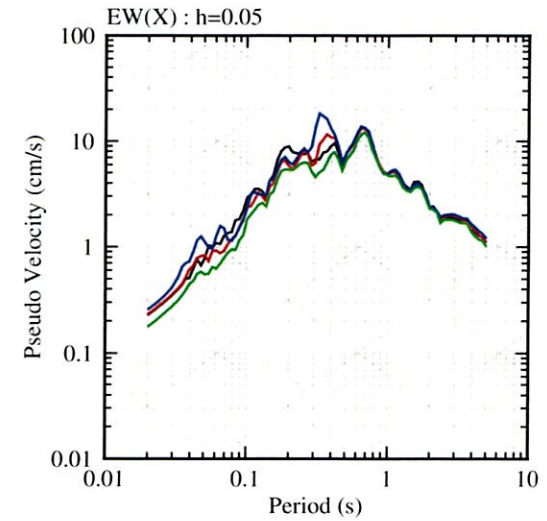
検証のイメージ



⑤ 鹿児島県北西部 (1997年5月本震)

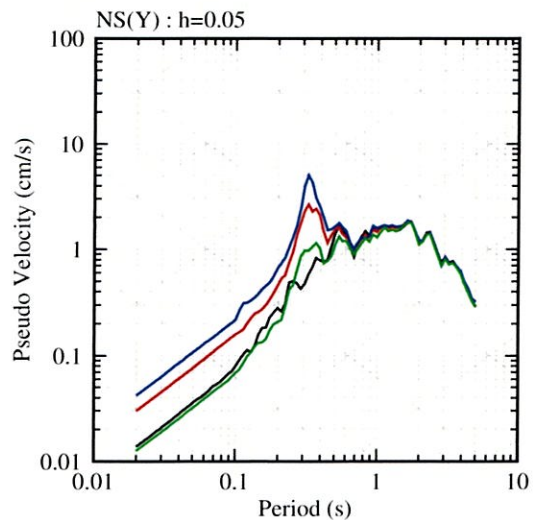


NS方向

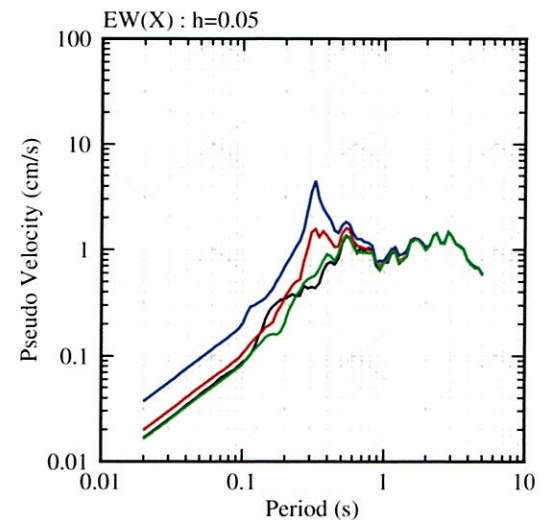


EW方向

⑥ 薩摩半島西方沖

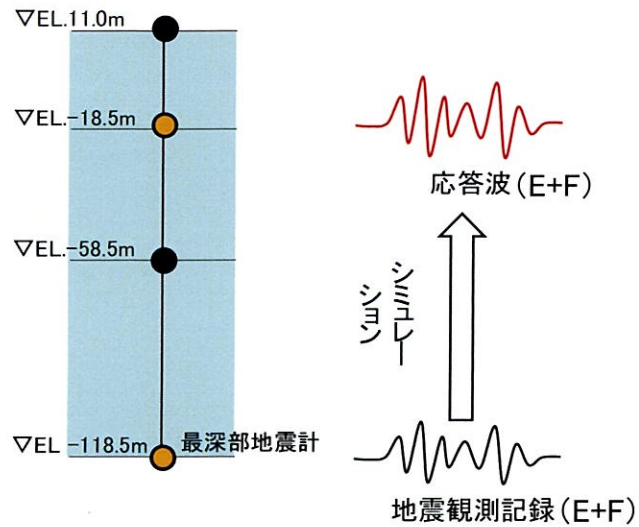


NS方向

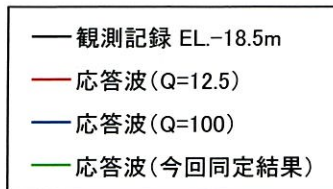


EW方向

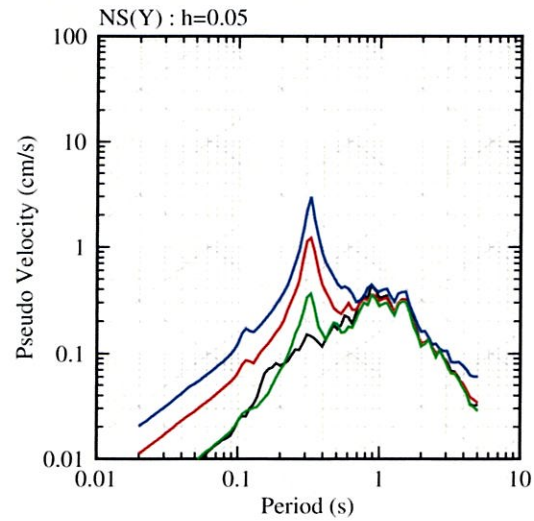
2. 地下構造モデルの設定



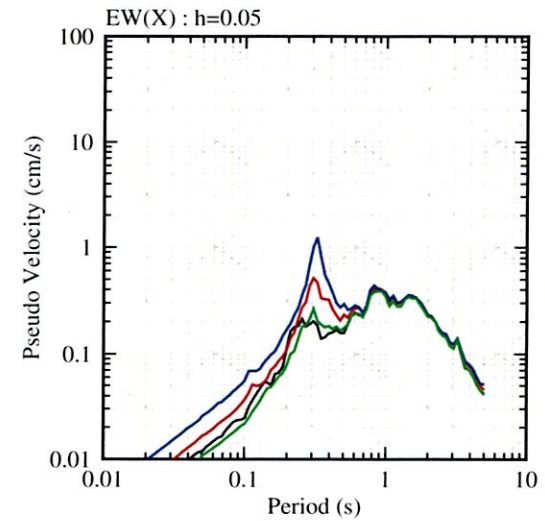
検証のイメージ



⑦薩摩半島西方沖

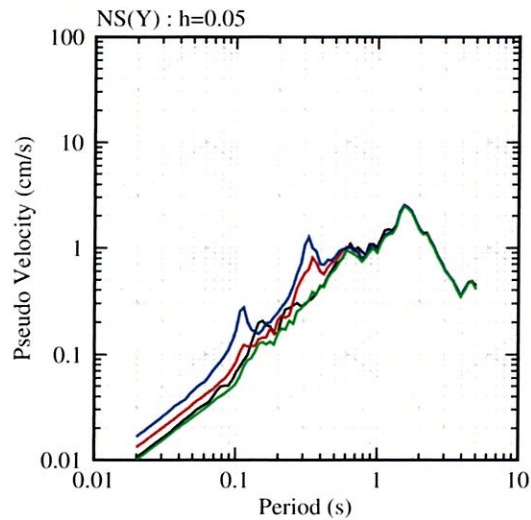


NS方向

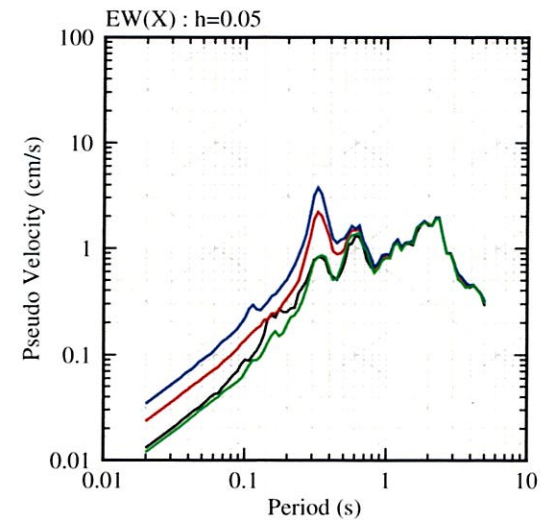


EW方向

⑧熊本県熊本地方 (2016年熊本地震前震)

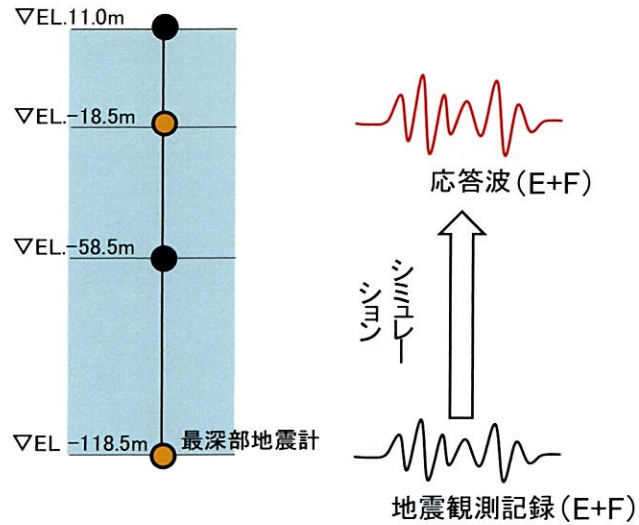


NS方向

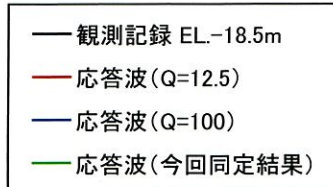


EW方向

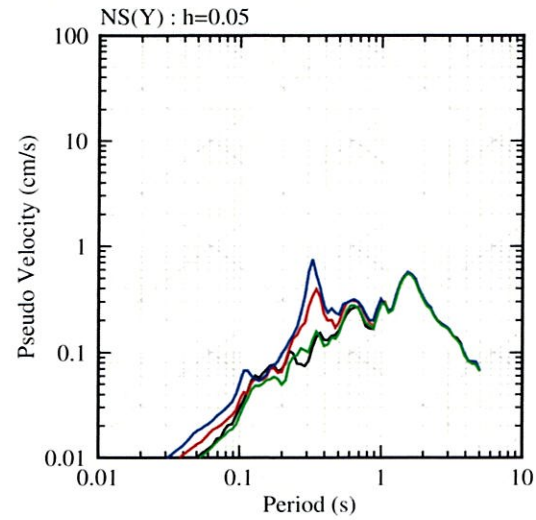
2. 地下構造モデルの設定



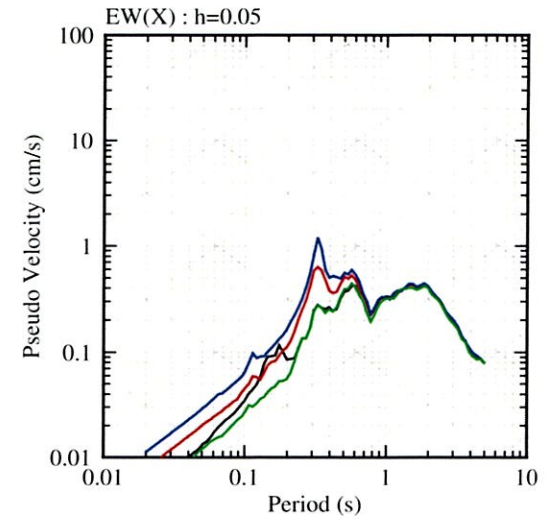
検証のイメージ



⑨ 熊本県熊本地方

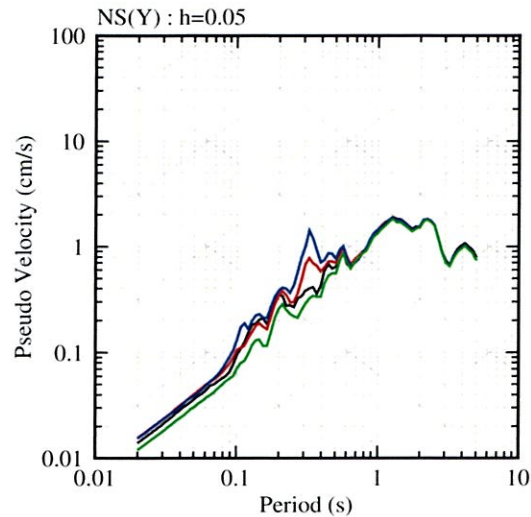


NS方向

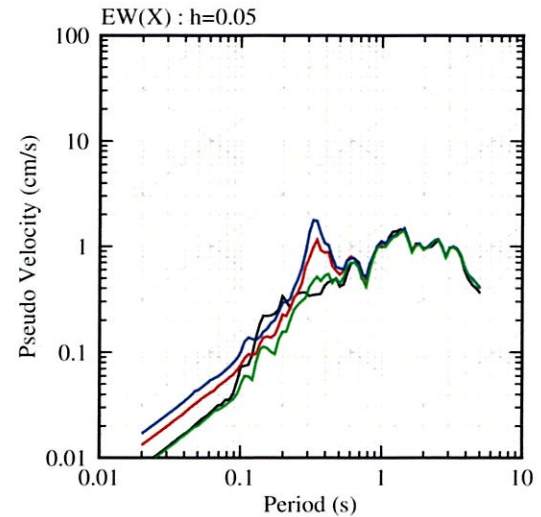


EW方向

⑩ 熊本県熊本地方

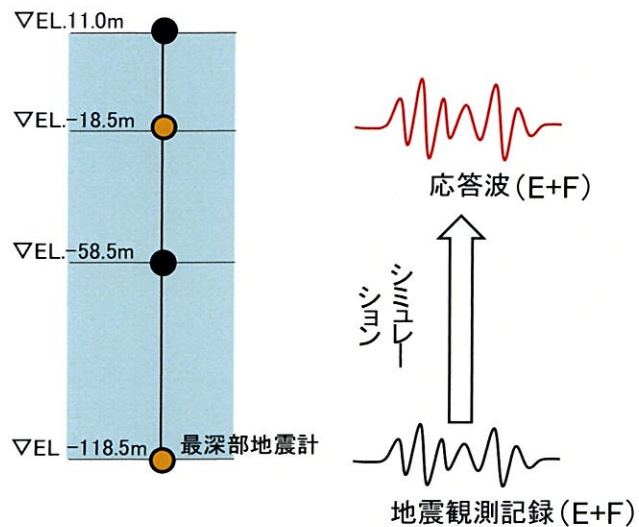


NS方向

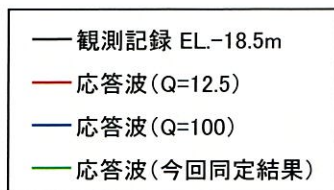


EW方向

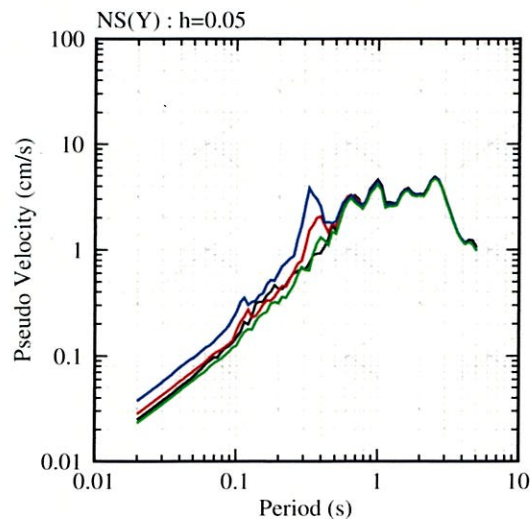
2. 地下構造モデルの設定



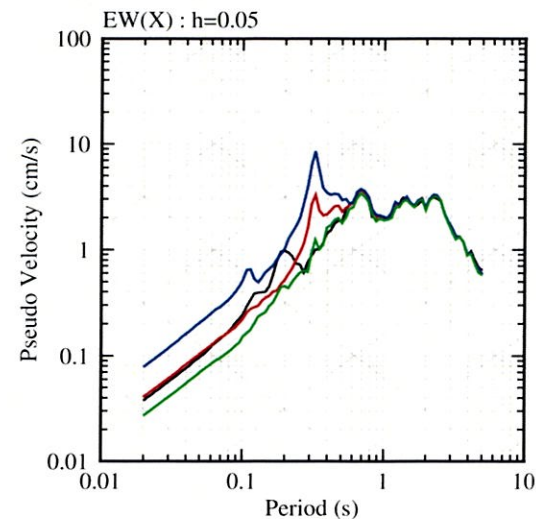
検証のイメージ



⑪ 熊本県熊本地方 (2016年熊本地震本震)

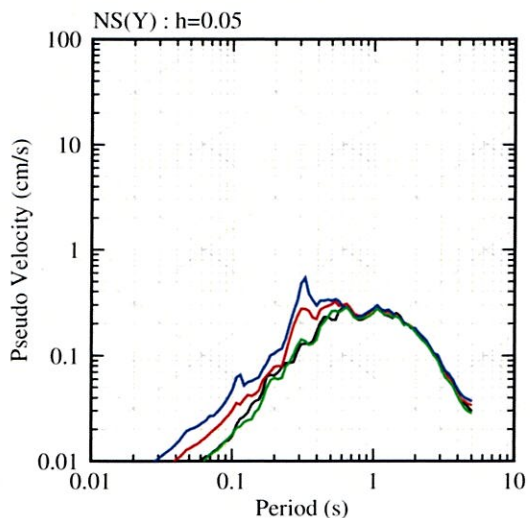


NS方向

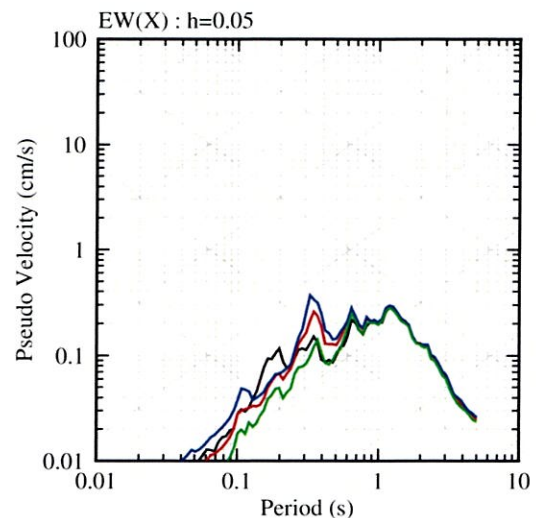


EW方向

⑫ 熊本県熊本地方

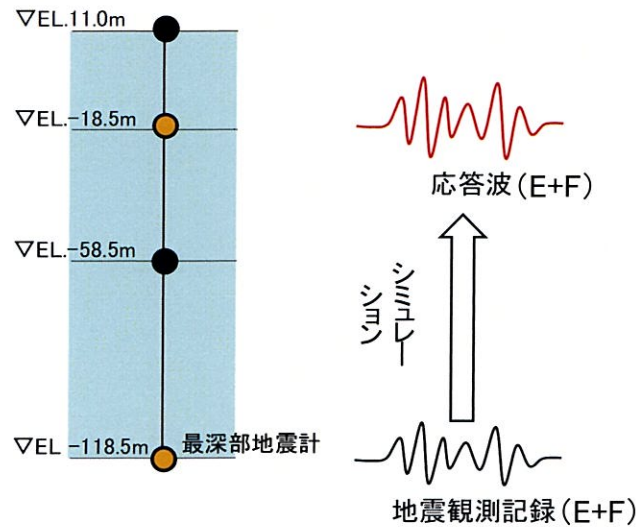


NS方向

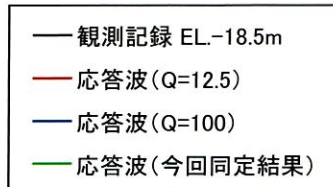


EW方向

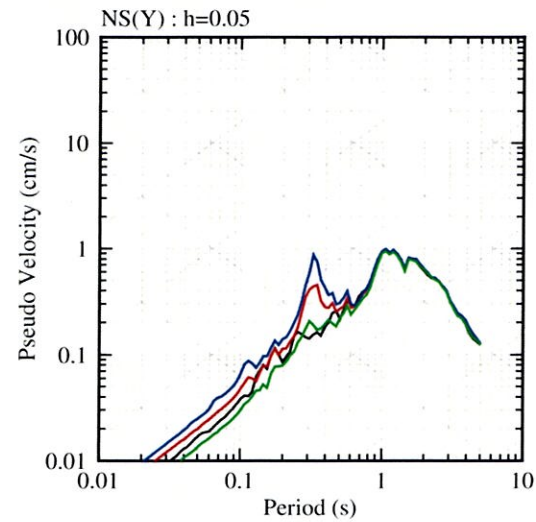
2. 地下構造モデルの設定



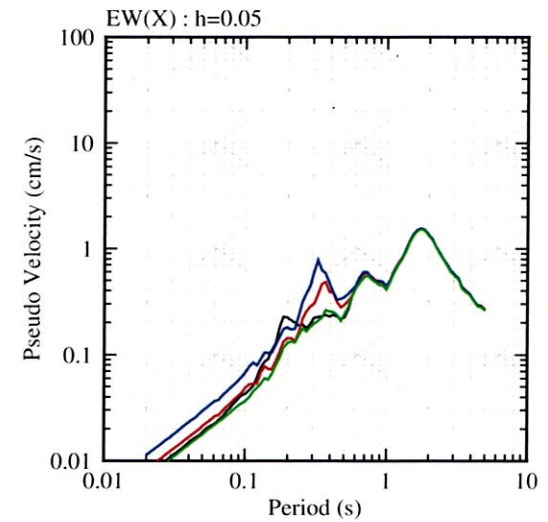
検証のイメージ



⑬ 熊本県熊本地方

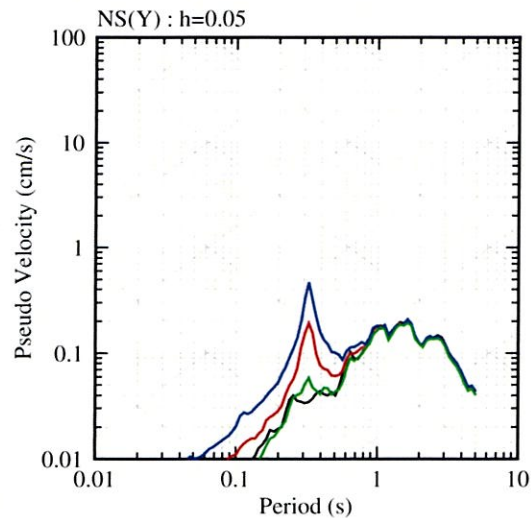


NS方向

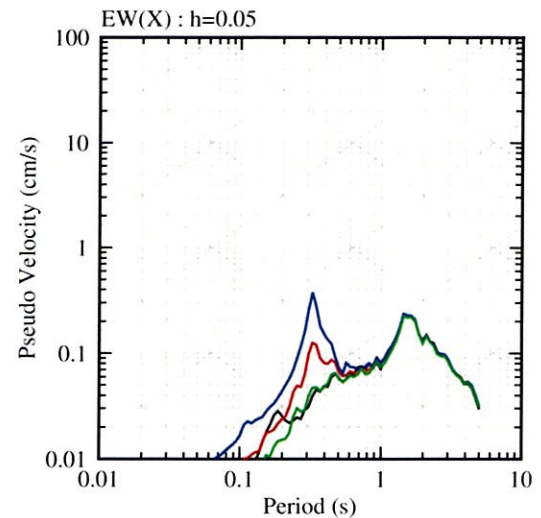


EW方向

⑭ 熊本県阿蘇地方

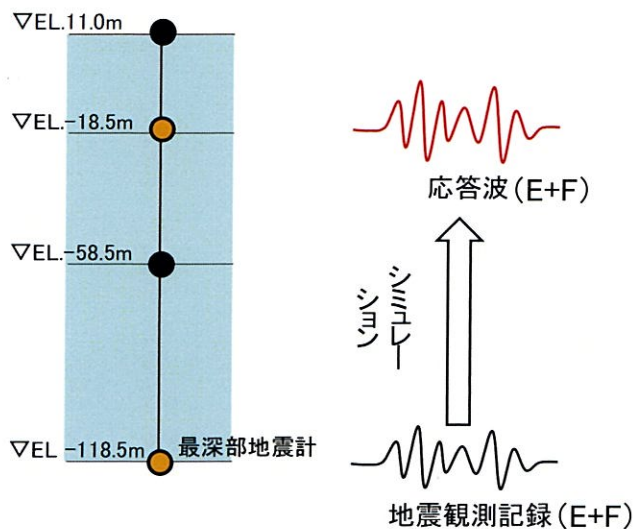


NS方向

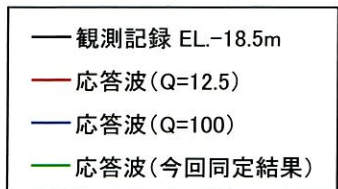


EW方向

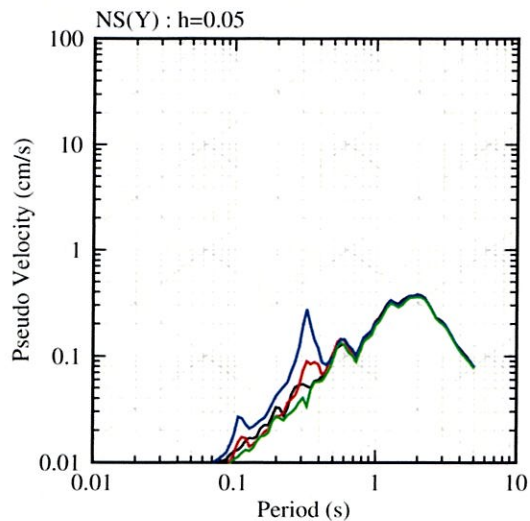
2. 地下構造モデルの設定



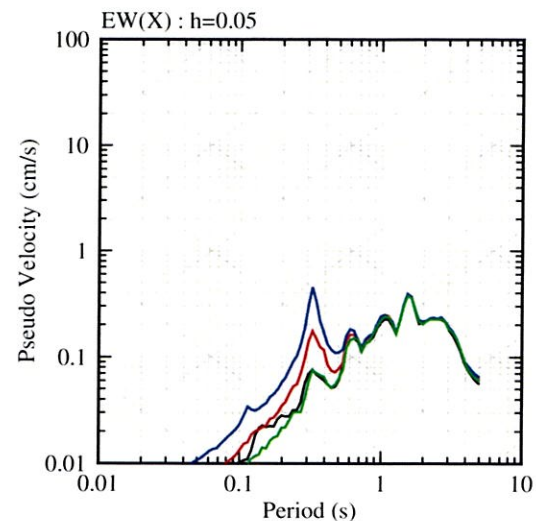
検証のイメージ



⑮ 熊本県阿蘇地方

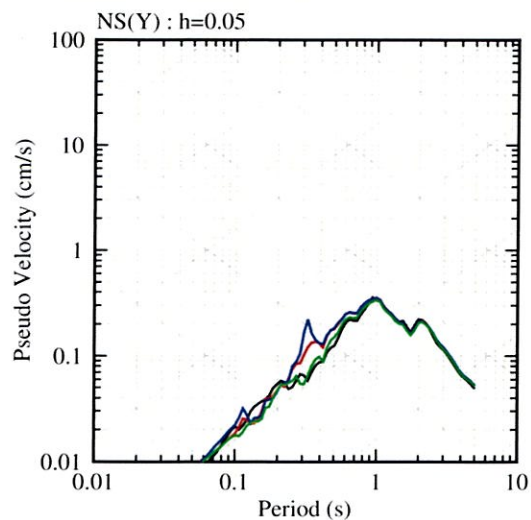


NS方向

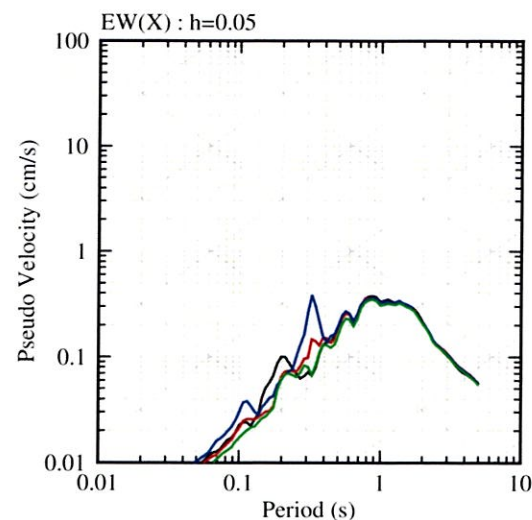


EW方向

⑯ 熊本県熊本地方

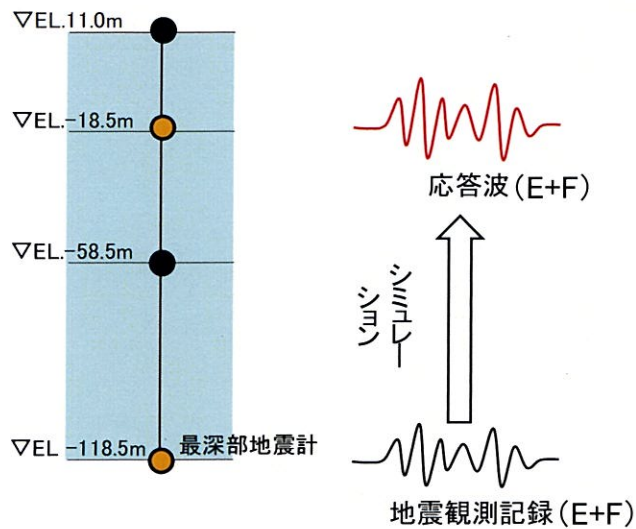


NS方向

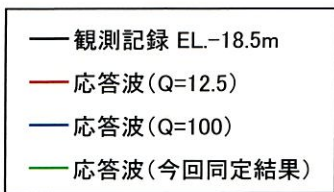


EW方向

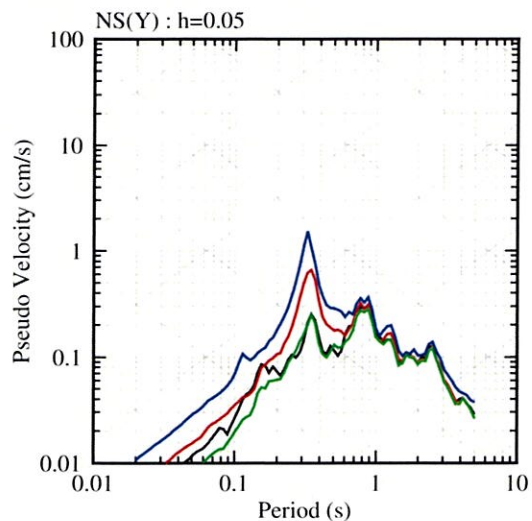
2. 地下構造モデルの設定



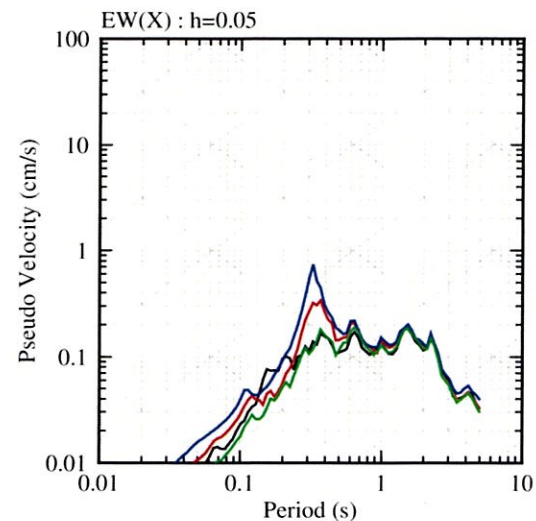
検証のイメージ



⑰ 熊本県熊本地方

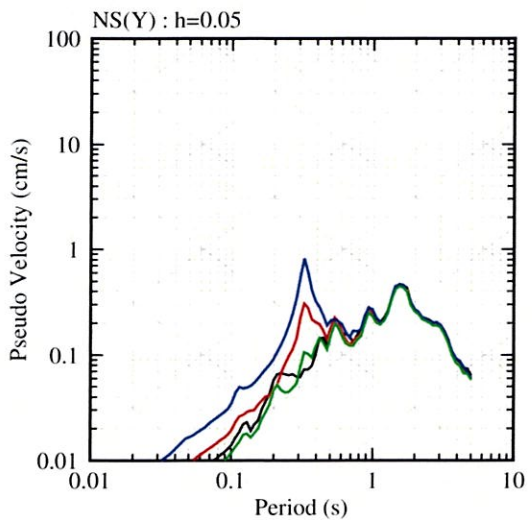


NS方向

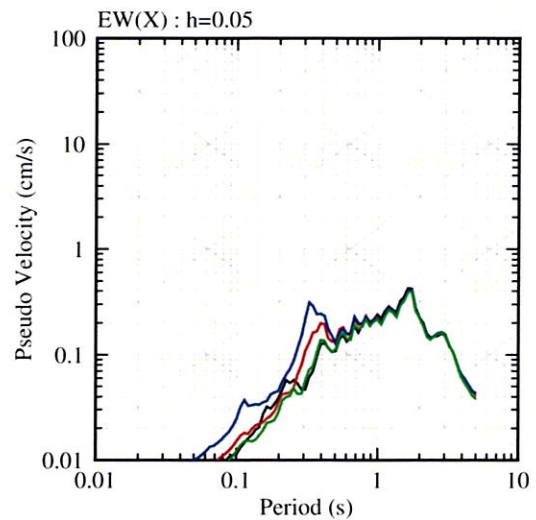


EW方向

⑱ 熊本県阿蘇地方

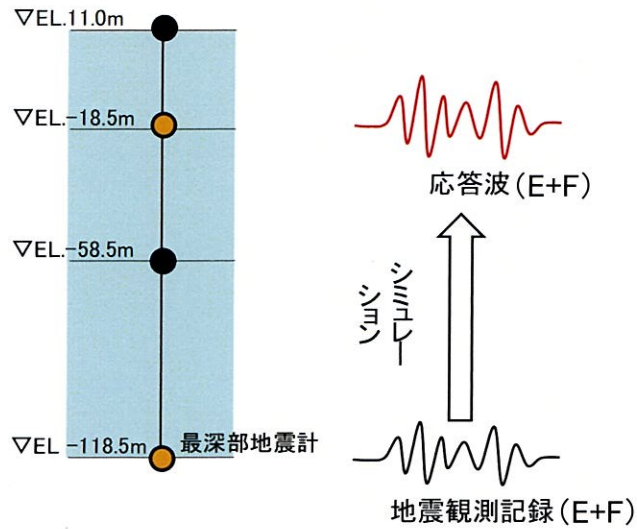


NS方向

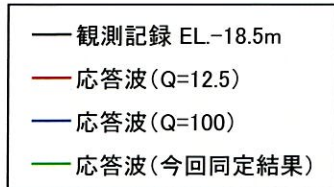


EW方向

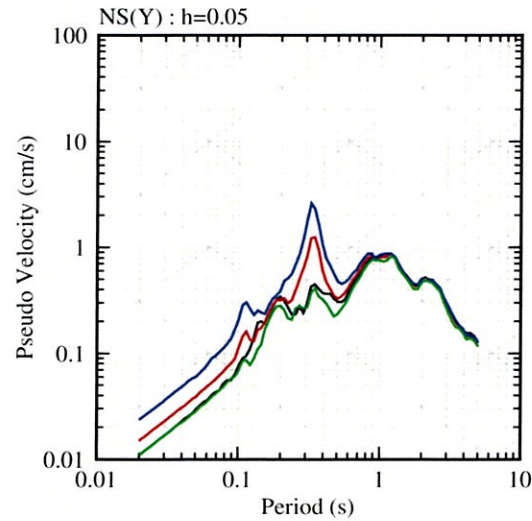
2. 地下構造モデルの設定



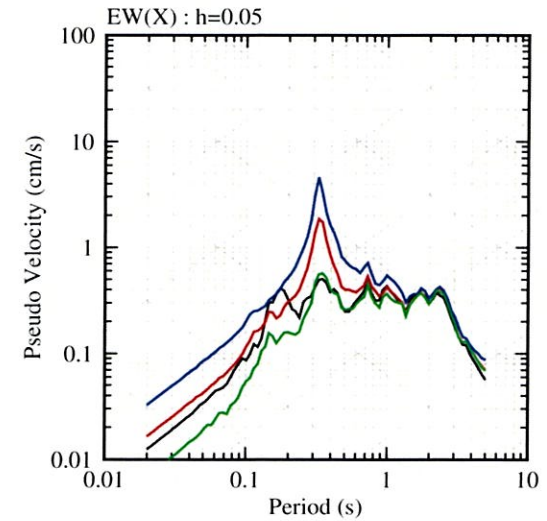
検証のイメージ



⑲ 熊本県熊本地方

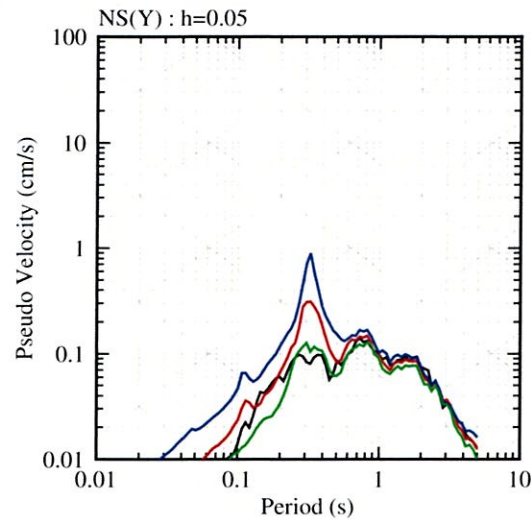


NS方向

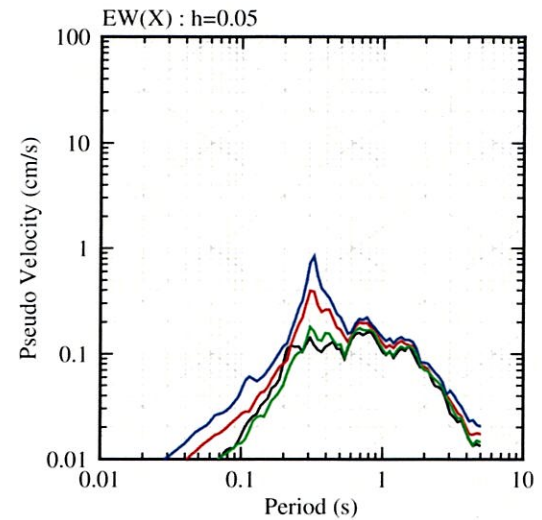


EW方向

⑳ 薩摩半島西方沖



NS方向



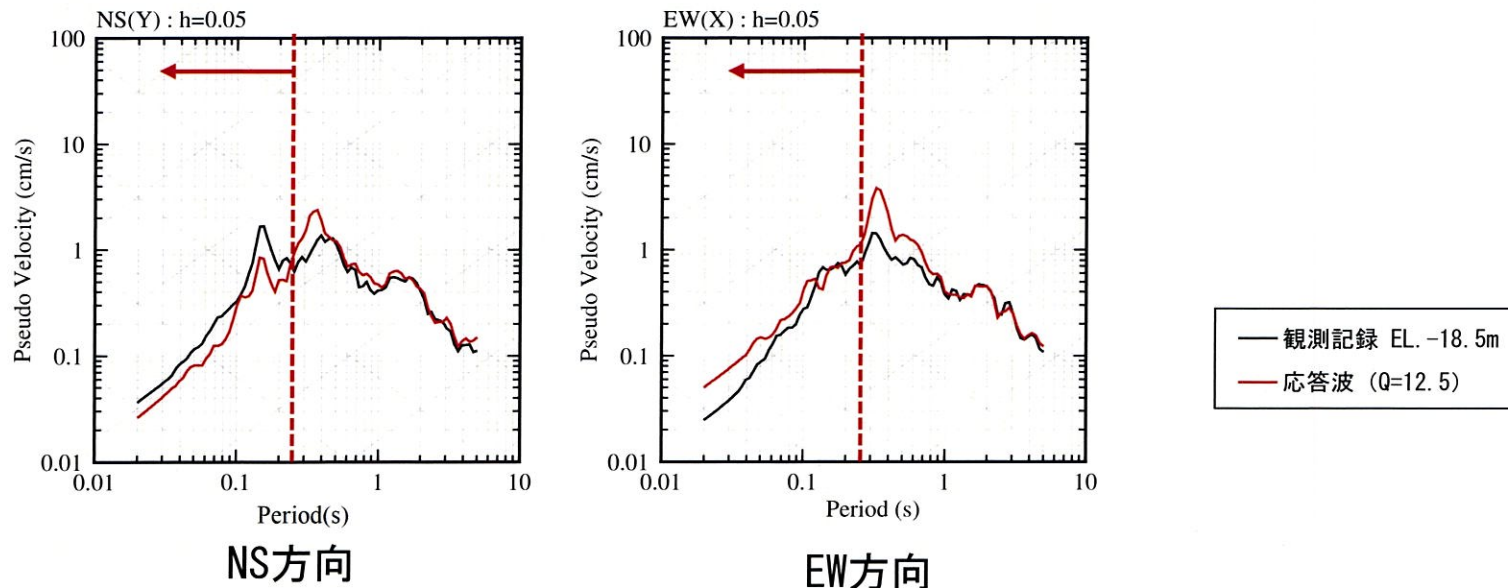
EW方向

2. 地下構造モデルの設定

【参考】②鹿児島県北西部地震（NS方向）の分析

- 地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルは、大半の地震において、地震観測記録の応答スペクトルと比べて、同等もしくは上回ることを確認。（例：②鹿児島県北西部地震（EW方向））
- ②鹿児島県北西部地震（NS方向）では、0.25秒程度以下の短周期帯において、地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルが地震観測記録の応答スペクトルを下回ることを確認。
- 上記傾向の要因として考えられる以下の影響について、確認を実施。
 - a. 理論伝達関数の卓越周波数付近における入力波の振幅特性による影響（51～54頁）
 - b. 加速度時刻歴波形に見られる特徴的な位相による影響（55頁）

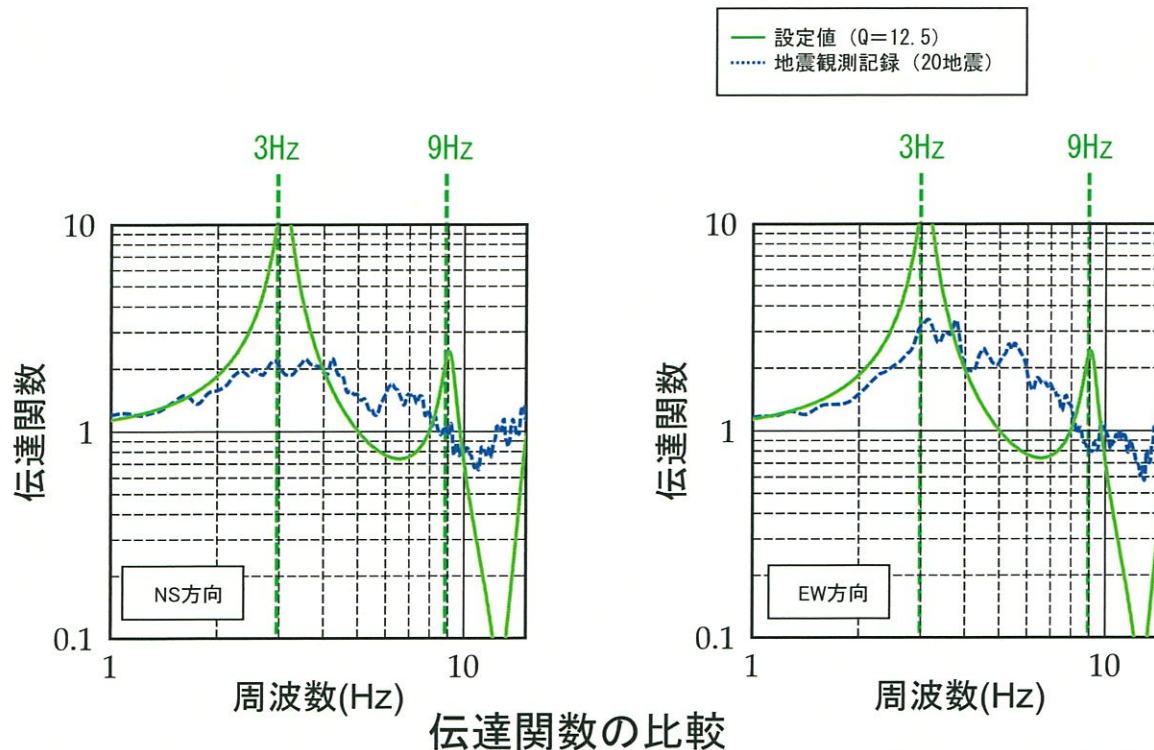
②鹿児島県北西部



2. 地下構造モデルの設定

- a. 理論伝達関数の卓越周波数付近における入力波の振幅特性による影響
伝達関数による傾向分析

- 地震観測記録（20地震）による平均伝達関数と理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）を比較すると、3Hz程度及び9Hz程度の卓越周波数付近では、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）は、地震観測記録（20地震）による平均伝達関数を大きく上回る傾向。
- 一方、3Hz程度及び9Hz程度の卓越周波数付近を除く周波数帯において、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）は地震観測記録（20地震）による平均伝達関数を下回る傾向。



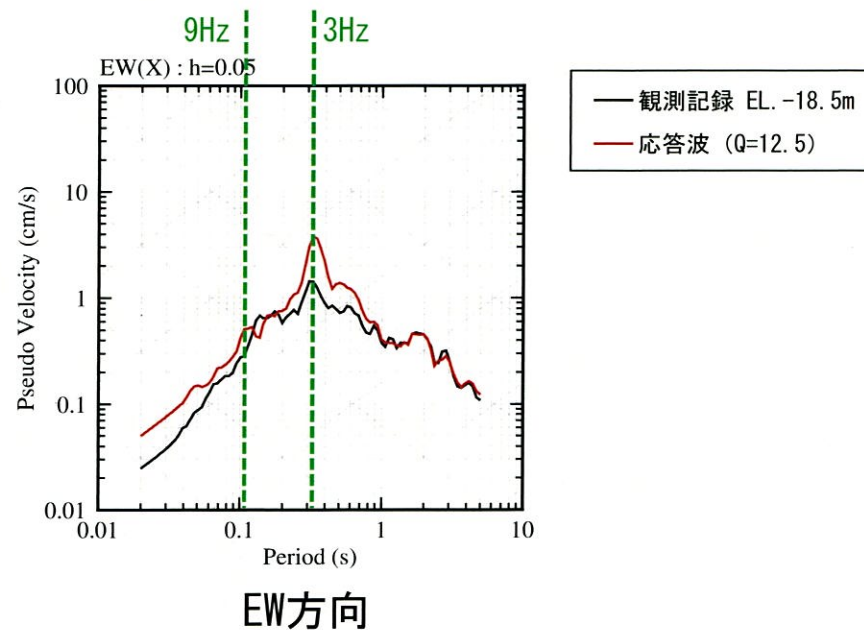
※観測記録の伝達関数はParzen Window 0.2Hzでスムージング

2. 地下構造モデルの設定

伝達関数による傾向と応答スペクトルによる傾向の差異

- 応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルを見ると、前頁の理論伝達関数 ($Q=12.5$) で大きなピークが見られた3Hz (0.33秒) 程度及び9Hz (0.11秒) 程度の卓越周波数付近でピークが見られ、理論伝達関数 ($Q=12.5$) のピークが反映されている。
- 一方、前頁の理論伝達関数 ($Q=12.5$) が地震観測記録の伝達関数を下回る周期帯では、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルが地震観測記録の応答スペクトルを上回り、フーリエ振幅スペクトルによる伝達関数とは異なる傾向。(例：②鹿児島県北西部地震 (EW方向))

例：②鹿児島県北西部 (EW方向)

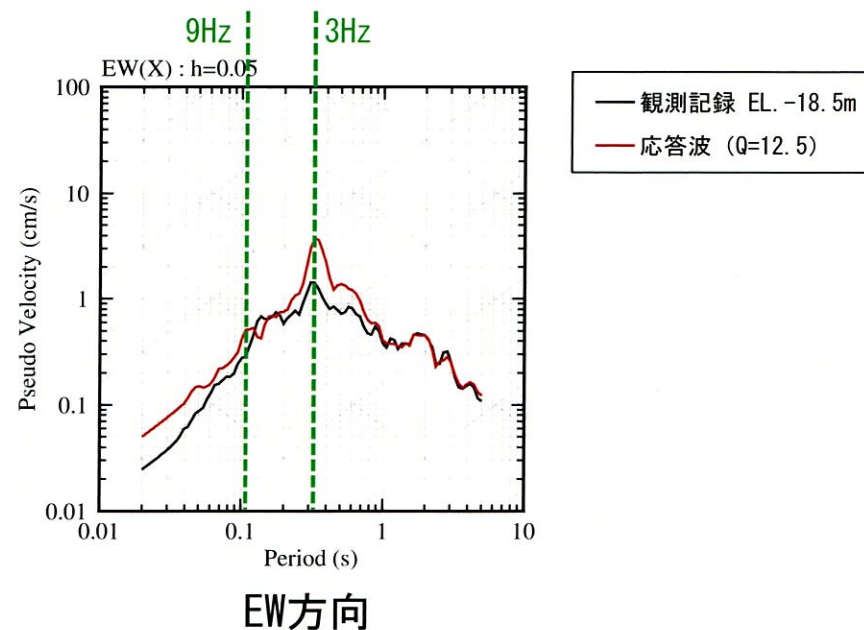


2. 地下構造モデルの設定

応答スペクトルの特性

- 前頁までを踏まえると、理論伝達関数 ($Q=12.5$) の卓越周波数付近 (3Hz程度及び9Hz程度) の大きなピークが当該周波数の周辺の周波数帯にも影響を与え、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされる。(例：②鹿児島県北西部地震 (EW方向))
- ただし、入力波 (地震観測記録 (EL. -118.5m)) において、理論伝達関数 ($Q=12.5$) の卓越周波数付近の振幅が小さいと、理論伝達関数 ($Q=12.5$) のピークの影響が反映されず、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされないと考えられる。

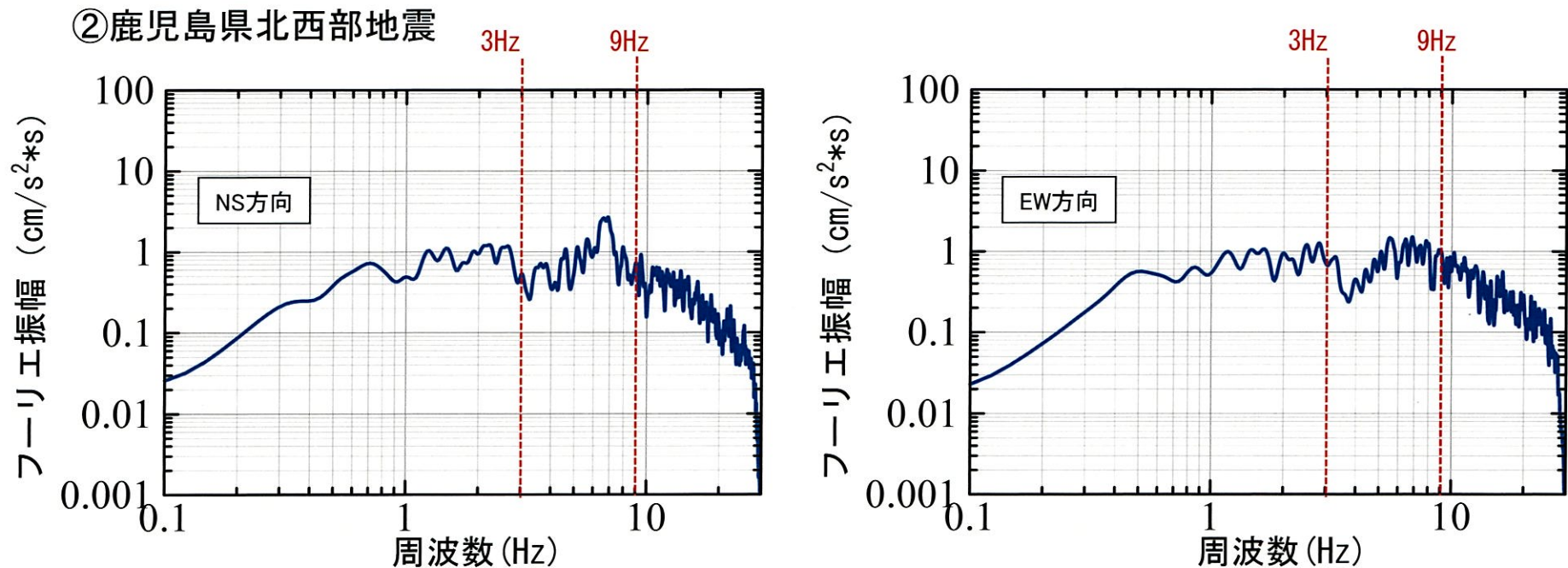
例：②鹿児島県北西部 (EW方向)



2. 地下構造モデルの設定

②鹿児島県北西部地震（NS方向）のフーリエ振幅スペクトル（EL. -118.5m）の分析

- ②鹿児島県北西部地震（NS方向）のフーリエ振幅スペクトルは、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）の3Hz程度の卓越周波数付近で振幅が小さい特性を確認。
- 上記の影響で、応答波（ $Q=12.5$ ）の応答スペクトルの短周期帯では、理論伝達関数（ $Q=12.5$ ）のピークの影響が反映されず、嵩上げされなかったことが、応答波（ $Q=12.5$ ）の応答スペクトルが観測記録の応答スペクトルを下回った1つの要因と考えられる。



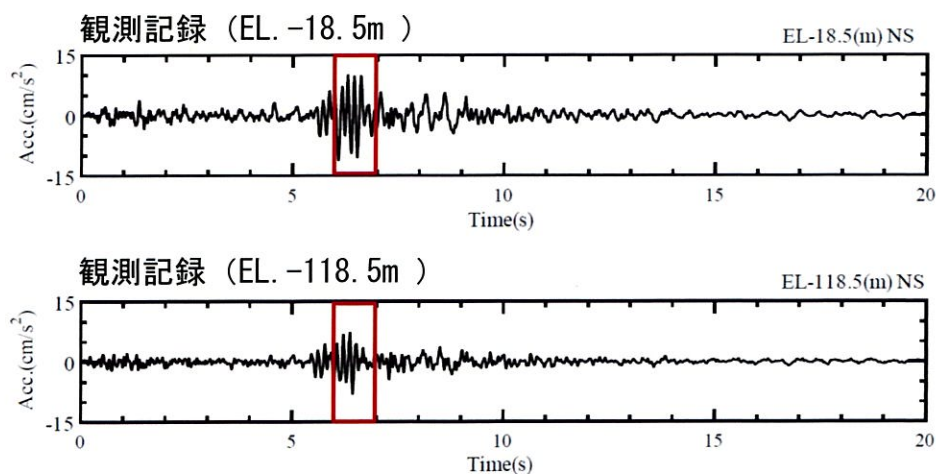
観測記録（EL. -118.5m）のフーリエ振幅スペクトル

2. 地下構造モデルの設定

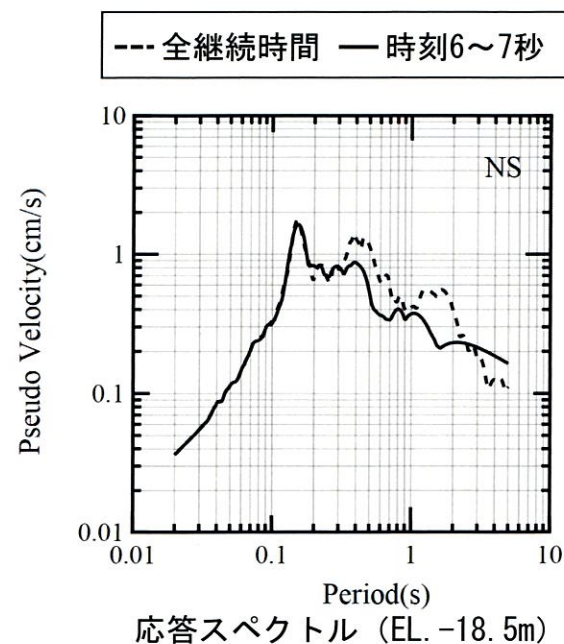
b. 加速度時刻歴波形に見られる特徴的な位相による影響

②鹿児島県北西部地震の加速度時刻歴波形の分析

- ②鹿児島県北西部地震（NS方向）の観測記録の応答スペクトル（EL. -18.5m）には、周期0.15秒で特異なピークが見られる。
 - ・ EL. -18.5mの観測記録の加速度時刻歴波形を見ると、時刻6～7秒に単一周期の正弦波が連続しているような特徴的な位相が見られる。
 - ・ 単一周期の正弦波が連続している位相は応答スペクトルを増幅させる。
 - ・ 周期0.15秒の応答スペクトルの特異なピークは、時刻6～7秒部分の正弦波が連続する特徴的な位相部分で生じている。
- この影響で、観測記録の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされたことが、応答波（ $Q=12.5$ ）が観測記録の応答スペクトルを下回った1つの要因と考えられる。



加速度時刻歴波形



応答スペクトル (EL. -18.5m)

2. 地下構造モデルの設定

応答スペクトルによる設定した地盤減衰の確認のまとめ

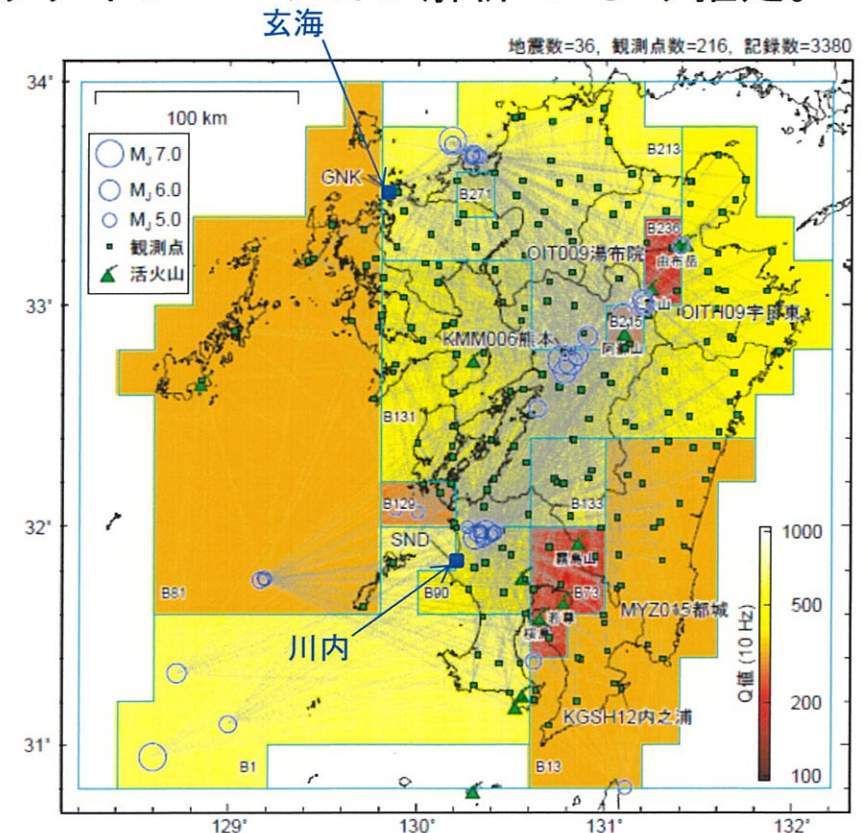
- 地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルは、大半の地震において、地震観測記録の応答スペクトルに比べて、同等もしくは上回ることを確認。
 - ・ ②鹿児島県北西部地震 (NS方向) の0.25秒程度以下の短周期帯において、地盤減衰 ($Q=12.5$) による応答波の応答スペクトルが地震観測記録の応答スペクトルを下回ることを確認。
- ②鹿児島県北西部地震 (NS方向) は、以下の複数の影響を受けていることを確認し、特異な地震観測記録であると判断。
 - a. 理論伝達関数 ($Q=12.5$) の卓越周波数付近で入力波の振幅が小さい特性により、応答波 ($Q=12.5$) の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされなかった影響。
 - b. ②鹿児島県北西部地震 (NS方向) の観測記録 (EL. -18.5m) に見られる単一周期 (0.15秒) の正弦波が連続する特徴的な位相により、観測記録の応答スペクトルの短周期帯が嵩上げされた影響。
- 以上より、大半の地震において、応答波 ($Q=12.5$) が地震観測記録と同等もしくは上回ること、下回るものについては特異な地震観測記録であることから、設定した地盤減衰 ($Q=12.5$) は妥当と判断。

2. 地下構造モデルの設定

C. 地震観測記録に基づく地盤増幅率による確認

- 設定した地盤減衰($Q=12.5$)を用いた一次元波動論に基づく地盤増幅率と、友澤ほか(2019a)^{5),6)}で推定された川内原子力発電所の地盤増幅率との比較を実施。
- 友澤ほか(2019a)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
 - ・ $M_j 4.8$ 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 $M_j 5.5$ 以上)
 - ・ K-NET地表観測記録、KiK-net地中観測記録、川内原子力発電所地表観測記録、玄海原子力発電所地表観測記録を対象
 - ・ 地表の最大加速度が三成分とも 200cm/s^2 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。



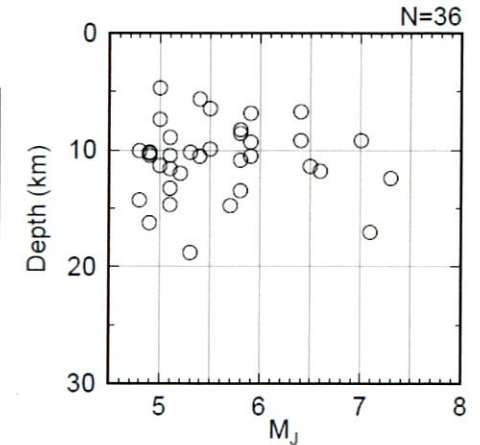
検討に用いた地震の震央分布及び観測点位置

友澤ほか(2019a)に加筆

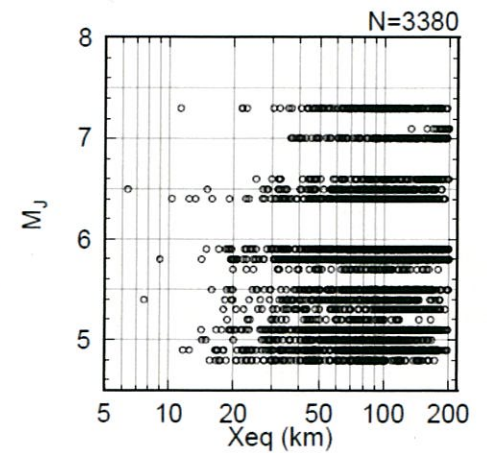
2. 地下構造モデルの設定

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

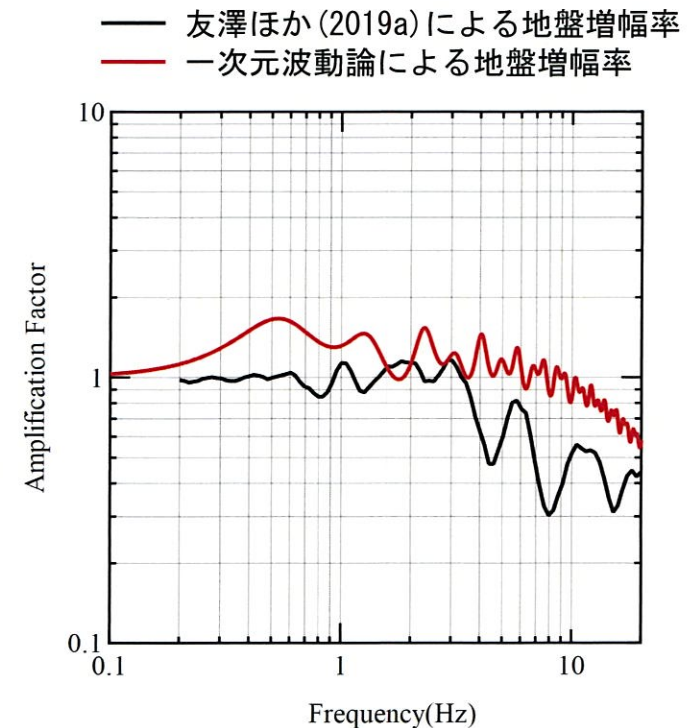
2. 地下構造モデルの設定

- 設定した地下構造モデルにおける $V_s=3010\text{m/s}$ の層上面から地表まで一次元波動論に基づき算出した地盤増幅率と、友澤ほか(2019a)で推定された川内原子力発電所の地盤増幅率を比較した結果、友澤ほか(2019a)による地盤増幅率に比べ一部周波数帯で同等もしくは大きいことを確認。

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.	密度 ρ (g/cm^3)	V_s (m/s)	Q値
11.0m	2.70	1500	12.5
-18.5m	2.70	1500	12.5
-28.5m	2.70	1600	12.5
-200m	2.70	1600	100
-480m	2.70	2150	200
-1018.5m	2.70	3010	200
-2018.5m	2.70	3240	300
-3018.5m	2.70	3500	300
-17018.5m	3.00	3800	500
-33018.5m	3.30	4300	500

解放基盤表面(EL. -18.5m)上に層を追加



2. 地下構造モデルの設定

- 以上を踏まえ、解放基盤表面（EL. -18.5m）からEL. -200m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.	層上面 (km)	密度 ρ (g/cm ³)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Q 値
解放基盤表面 -18.5m	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500

3. 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⁹⁾

「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)¹⁾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)¹⁰⁾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¹¹⁾

「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 4601-2015¹²⁾

「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。

3. 地震基盤相当面の設定

- 前頁での解釈を踏まえ、川内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 $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面（EL. -480m）に設定。
- 上記設定における $V_s=2150\text{m/s}$ 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、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。
- 仮想的な検討による $V_s=2200\text{m/s}$ の層上面に地震基盤相当面を設定した場合、現状の $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面に地震基盤相当面を設定した場合より、解放基盤表面までの地盤増幅率は小さい傾向。
- これを踏まえ、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 $V_s=2150\text{m/s}$ の層上面に地震基盤相当面を設定。

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.	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 -18.5m	0.0	2.70	1500	3200	12.5
-28.5m	-0.01	2.70	1600	3700	12.5
-200m	-0.182	2.70	1600	3700	100
-480m	-0.462	2.70	2150	4400	200
-1018.5m	-1.0	2.70	3010	5200	200
-2018.5m	-2.0	2.70	3240	5600	300
-3018.5m	-3.0	2.70	3500	5900	300
-17018.5m	-17.0	3.00	3800	6600	500
-33018.5m	-33.0	3.30	4300	7600	500

▼地震基盤相当面

4. 既許可の基準地震動への影響評価

現行の基準地震動の概要

- 既許可では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」による基準地震動Ss-1及び「震源を特定せず策定する地震動」による基準地震動Ss-2を策定。
 - 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」では、検討用地震の「応答スペクトルに基づく手法」による地震動評価結果を包絡して、基準地震動Ss-1を策定。
 - 基準地震動Ss-1は、「断層モデルを用いた手法」による地震動評価結果を上回ることから、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の基準地震動は、基準地震動Ss-1で代表。
 - 「震源を特定せず策定する地震動」のうち、Mw6.5程度以上の2000年鳥取県西部地震及び2008年岩手・宮城内陸地震の2つの地震の震源域周辺は、川内原子力発電所周辺と地質学的・地震学的背景が異なり、同様の地震は発生しないと考えられるため、該当なし。
 - Mw6.5程度未満の地震は、2004年北海道留萌支庁南部地震の震源近傍のK-NET港町観測点の解放基盤波に当社独自の検討から余裕を持たせた地震動を設定。設定した地震動が、一部の周期帯で基準地震動Ss-1を上回ることから、基準地震動Ss-2として策定。

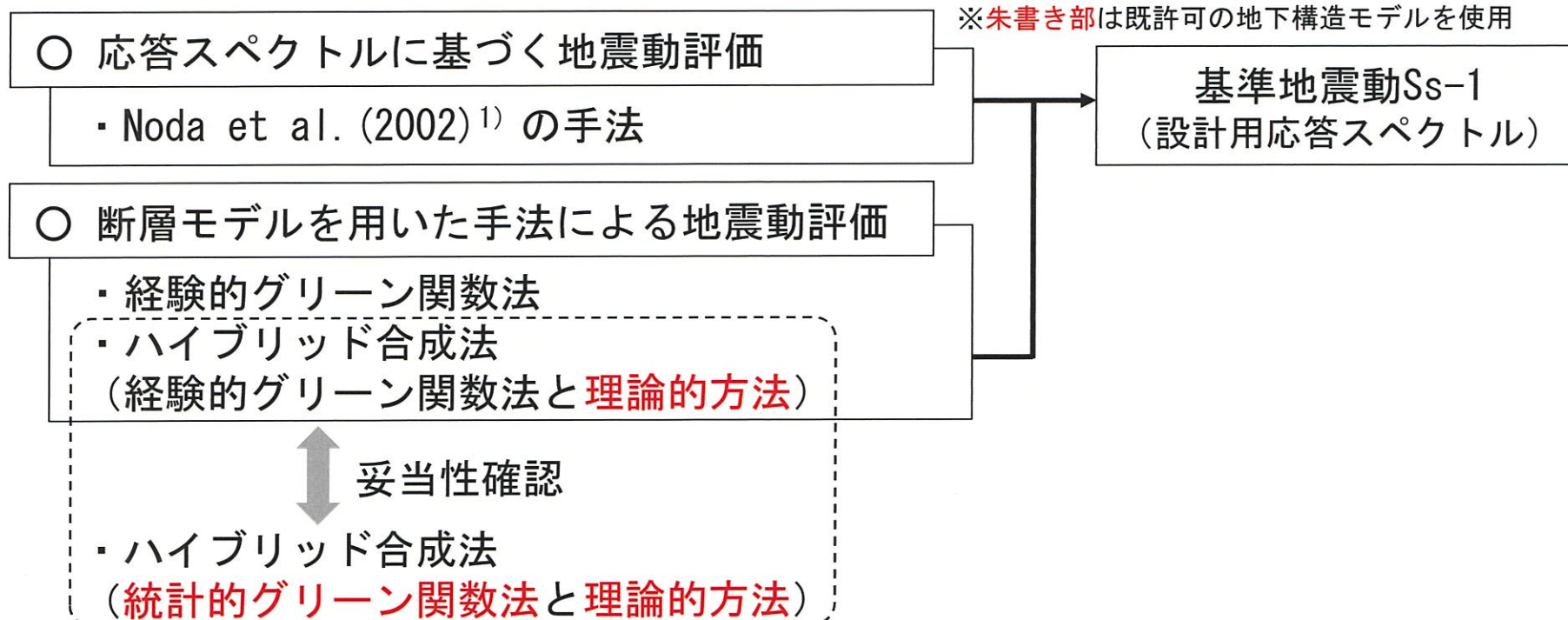
4. 既許可の基準地震動への影響評価

既許可の地下構造モデルの位置づけ

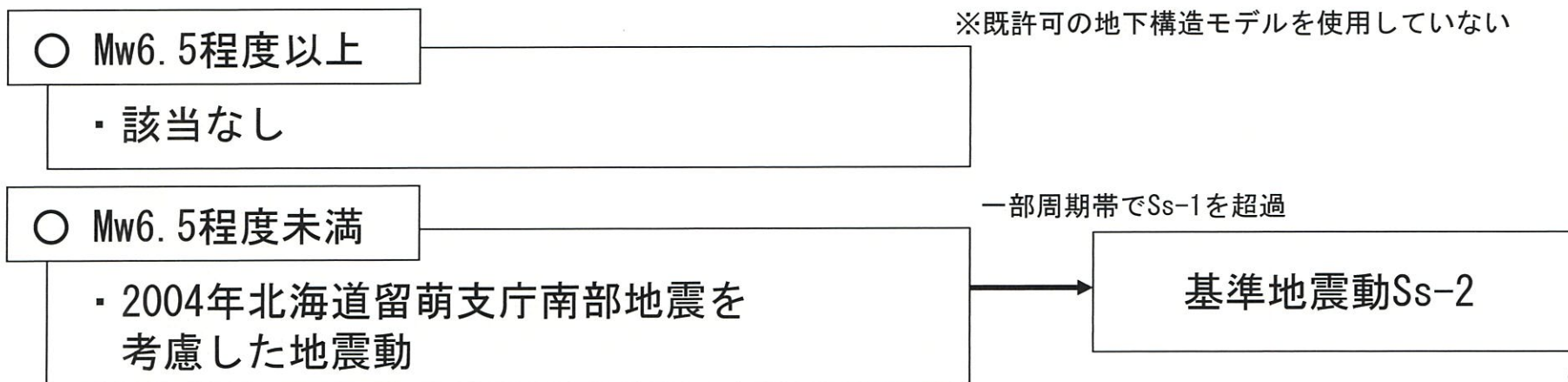
- 既許可では、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の「断層モデルを用いた手法による地震動評価」において、長周期帯の地震動評価への適用を目的に、解放基盤表面以深の地下構造モデルを設定。
- 上記地下構造モデルは、「断層モデルを用いた手法による地震動評価」における「ハイブリッド合成法（短周期帯：経験的グリーン関数法、長周期帯：理論的方法）」（以下、「EGF+理論」とする。）のうち長周期帯の理論的方法による評価に使用。
- 既許可時審査において、「EGF+理論」の地震動の妥当性確認のための「ハイブリッド合成法（短周期帯：統計的グリーン関数法、長周期帯：理論的方法）」（以下、「SGF+理論」とする。）にも流用。
- なお、「震源を特定せず策定する地震動」においては、地下構造モデルを使用していない。

4. 既許可の基準地震動への影響評価

【既許可における「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」】



【既許可における「震源を特定せず策定する地震動」】



4. 既許可の基準地震動への影響評価

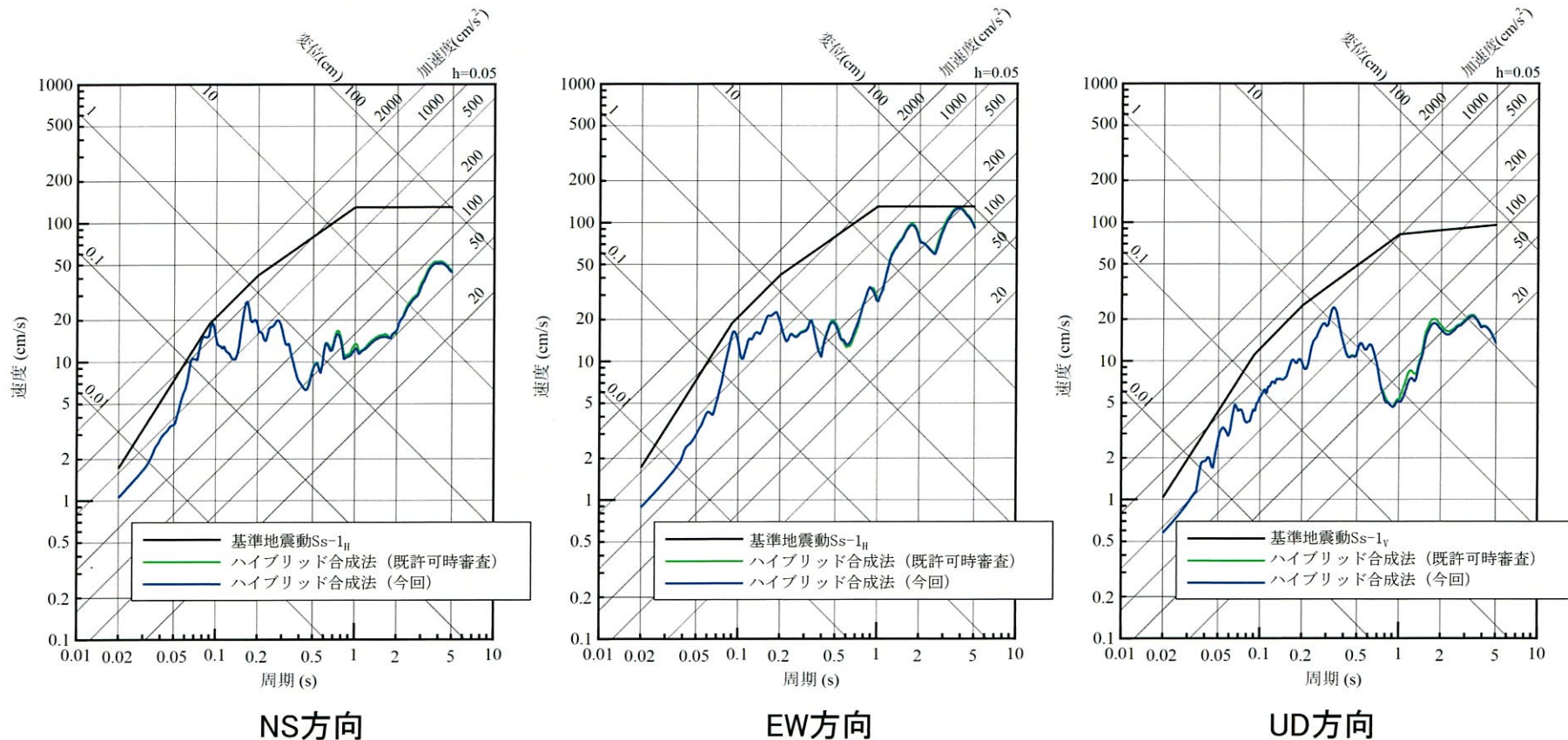
既許可の基準地震動への影響評価

- 今回設定した地下構造モデルを用いて、既許可の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の地震動評価への影響を確認。
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いた「EGF+理論」による評価結果に基づき、以下の比較を実施し、影響を確認。
 - ・ 上記評価結果と、既許可時の「EGF+理論」及び基準地震動 S_s-1 と比較。
- 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た「SGF+理論」による評価結果に基づき、以下の比較を実施し、影響を確認。
 - ・ 上記評価結果と、既許可時の「SGF+理論」、「EGF+理論」及び基準地震動 S_s-1 と比較。

4. 既許可の基準地震動への影響評価

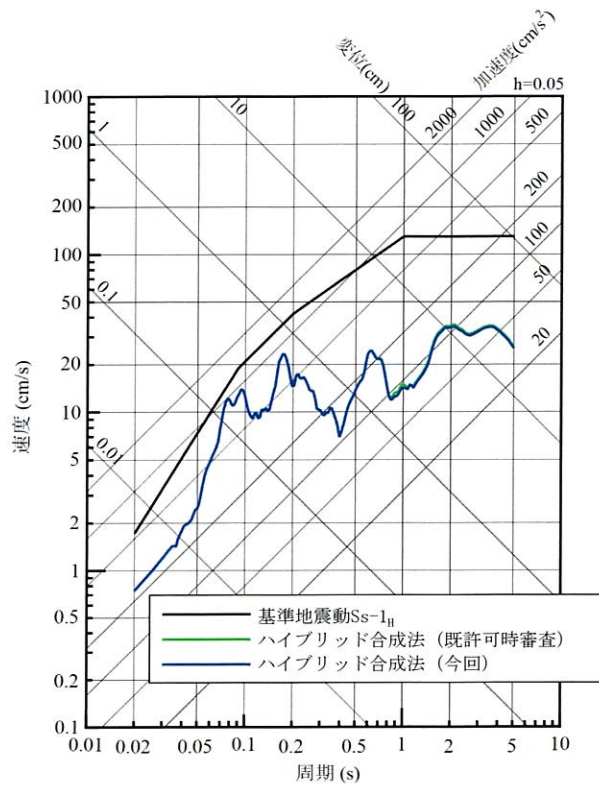
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いた「EGF+理論」による地震動評価結果から、以下の観点で、基準地震動Ss-1の策定結果に影響がないことを確認。
 - 既許可時の「EGF+理論」による評価結果と比較して、同等もしくは小さい。
 - 基準地震動Ss-1に包絡。

「甌断層帯甌区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：巨視的断層面下端）

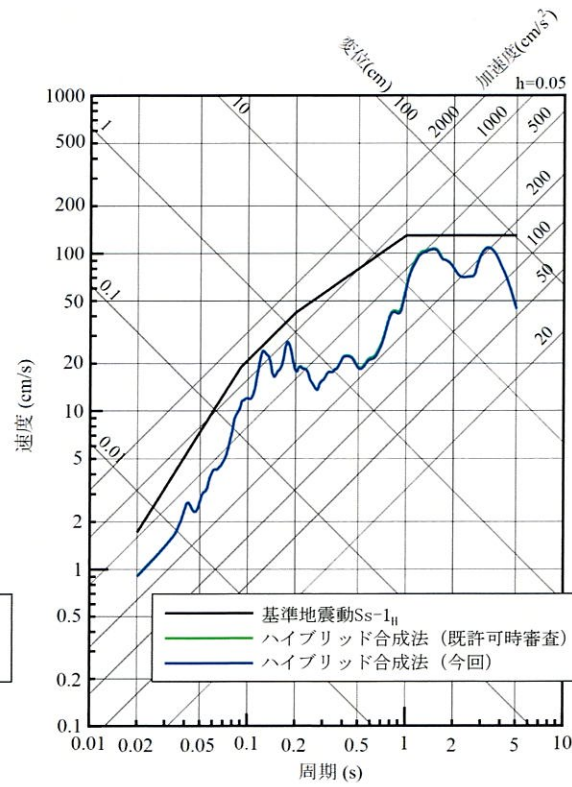


4. 既許可の基準地震動への影響評価

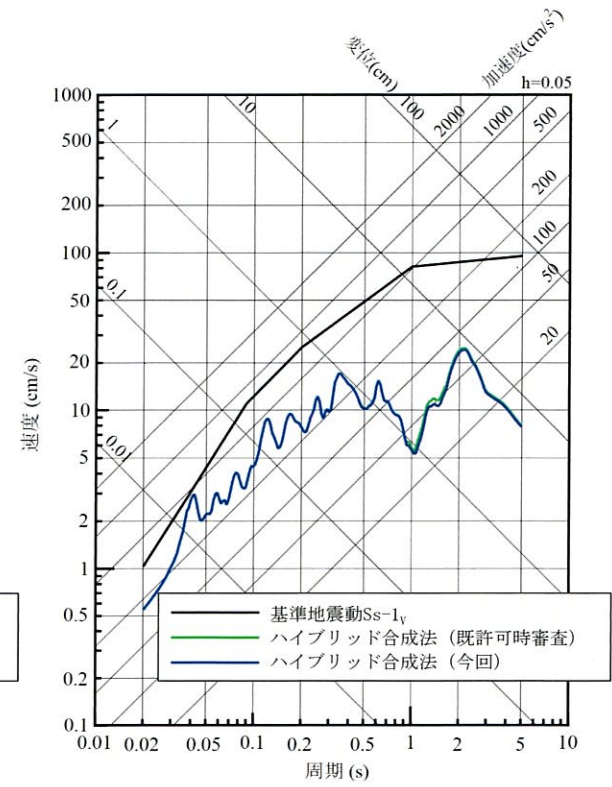
「甌断層帯甌区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：アスペリティ下端）



NS方向



EW方向



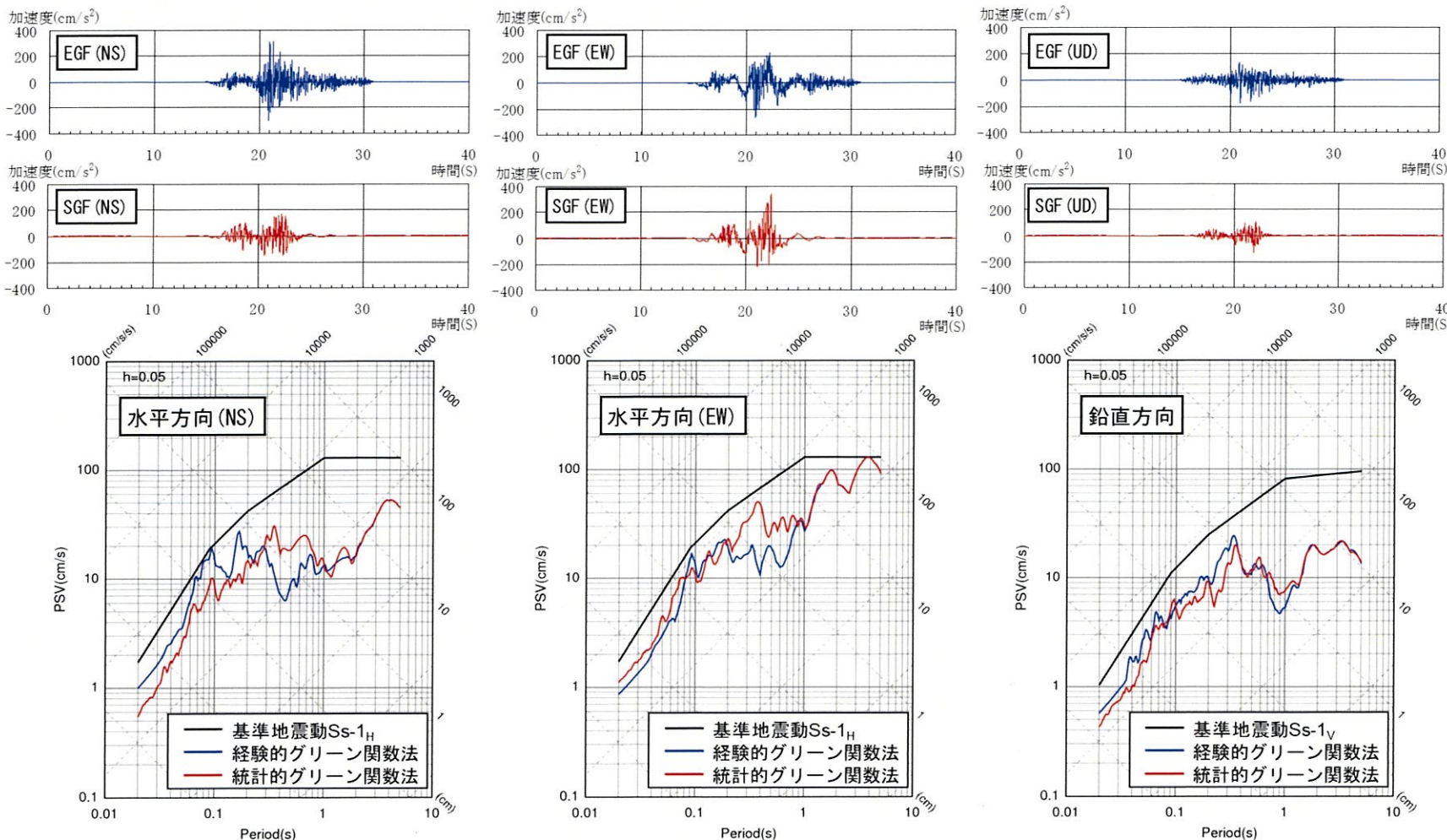
UD方向

4. 既許可の基準地震動への影響評価

「甌断層帯甌区間」による地震の応力降下量の不確かさを考慮した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)³³⁾による理論スペクトルと佐藤 (2004)³⁴⁾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)²⁸⁾により波形合成を行い、理論的方法とハイブリッド合成。

第114回
審査会合資料

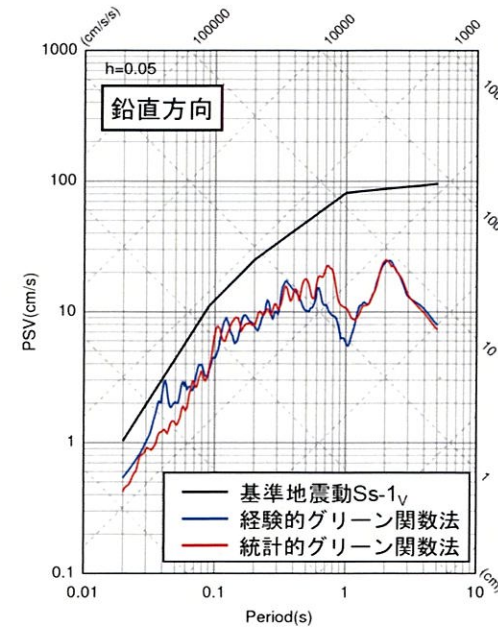
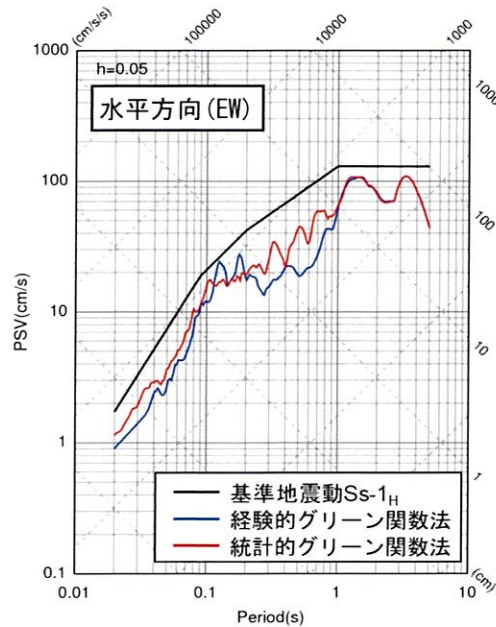
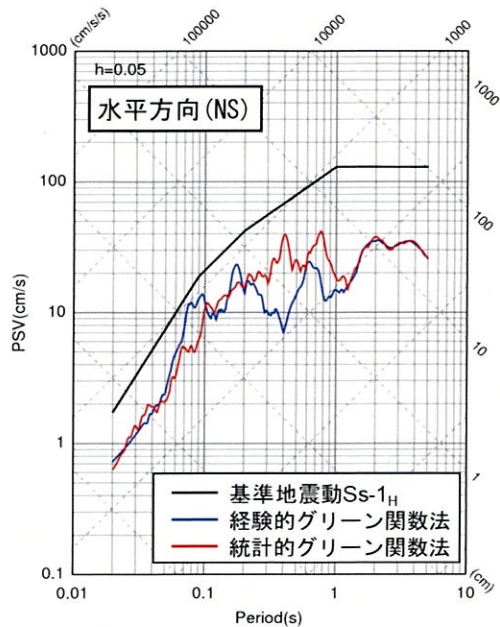
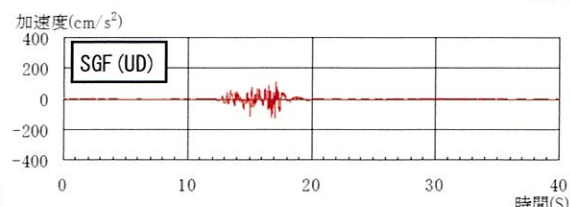
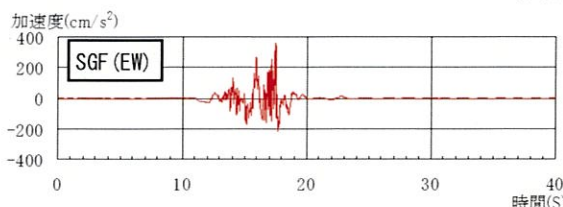
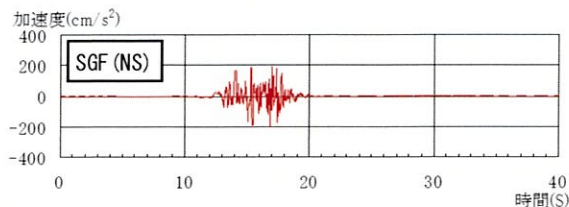
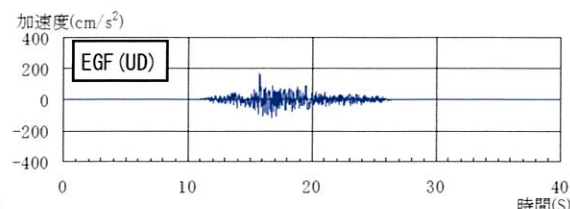
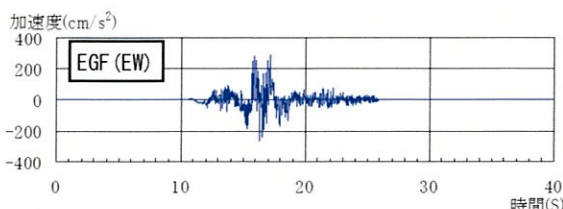
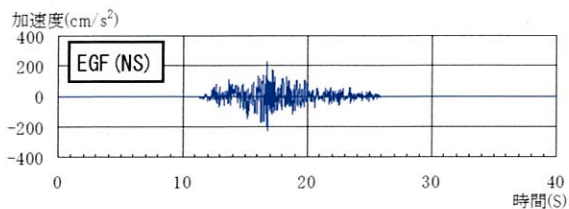


統計的グリーン関数法による地震動評価との比較(破壊開始点：巨視的断層面下端)

4. 既許可の基準地震動への影響評価

第114回
審査会合資料

統計的グリーン関数法による地震動評価

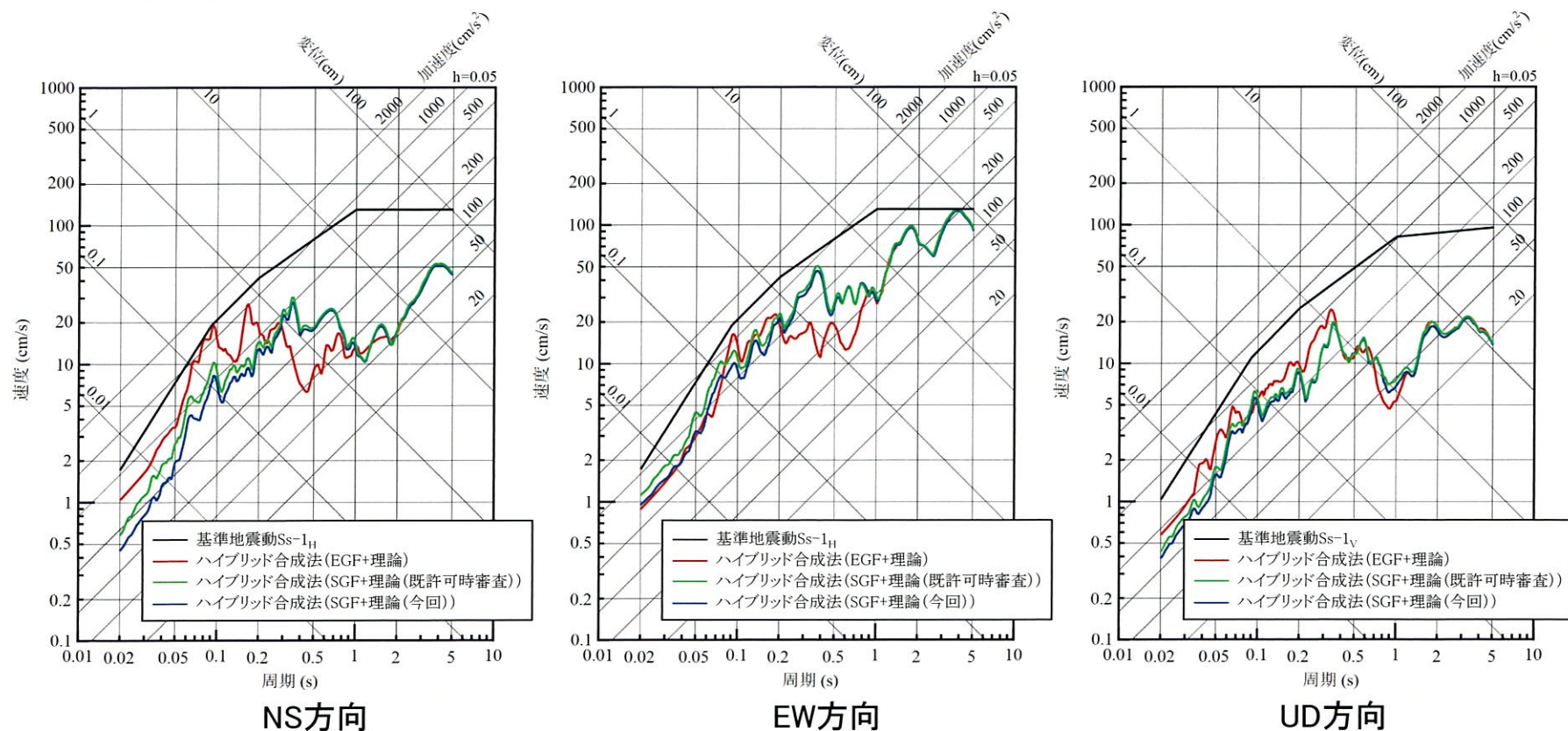


統計的グリーン関数法による地震動評価との比較(破壊開始点：アスペリティ下端)

4. 既許可の基準地震動への影響評価

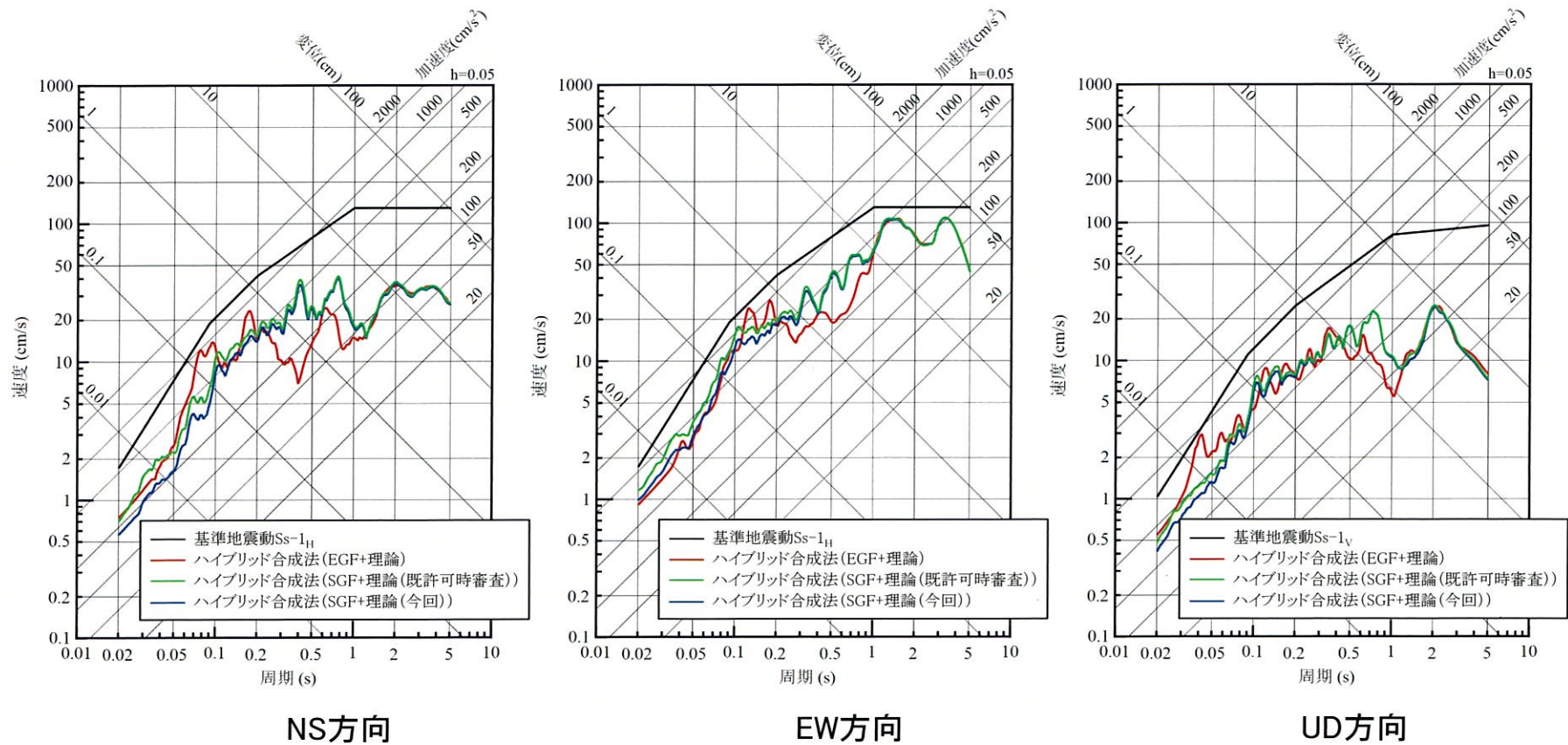
- 標準応答スペクトルを考慮した地震動評価に用いる地下構造モデルを用いた「SGF+理論」による地震動評価結果から、以下の観点で、基準地震動Ss-1の策定結果に影響がないことを確認。
 - 既許可時の「SGF+理論」による評価結果と比較して、同等もしくは小さい。
 - 「EGF+理論」による評価結果との関係性は既許可時から総合的に大きな差はない。
 - 基準地震動Ss-1に包絡。

「甌断層帯甌区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：巨視的断層面下端）



4. 既許可の基準地震動への影響評価

「断層帯帯断層区間による地震」：応力降下量の不確かさを考慮したケース（破壊開始点：アスペリティ下端）



4. 既許可の基準地震動への影響評価

既許可と今回の地下構造モデルの位置付け

- 既許可の地下構造モデルは長周期帯における理論的方法による評価への適用を目的に設定しており、今回設定した地下構造モデルは短周期帯も含む地震動評価への適用を目的に設定。
- 今回設定した地下構造モデルを用いて、既許可の「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」の地震動評価への影響を確認した結果、既許可時と比べて同等もしくは小さくなり、既許可の基準地震動への影響が無いことを確認。
- 上記の確認結果により、既許可の長周期帯における理論的方法による評価に用いる地下構造モデルは現行通りとする。